

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Študent**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Technická diagnostika suchých šnekových vývěv**
Technical Diagnostics of Dry Scroll Vacuum Pumps

Zásady pro vypracování:

V diplomové práci se zabývejte možnostmi diagnostiky suchých vakuových pump, proveďte měření a jejich vyhodnocení. V rešerši rozeberte problematiku tvorby vakua, vakuových pump atd. Proveďte celkové vyhodnocení a navrhněte způsob řešení.

V rámci zadání zpracujte:

- Rešerše na dané téma.
- Proveďte měření na daném objektu.
- Analyzujte frekvenční spektrum vibrací.
- Rozbor vývěvy a určení poruchových frekvencí jednotlivých komponent.
- Celkové vyhodnocení měření a návrh řešení.

Bližší podrobnosti stanoví vedoucí práce a firma Edwards, s.r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Vysoká škola báňská
Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní



Technická diagnostika suchých šnekových vývěv

Technical Diagnostics of Dry Scroll Vacuum Pumps

Student:

Bc. David Študent

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata

Ostrava 2011

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval společnosti Edwards s.r.o., s jejíž spoluprací byla vyhotovena tato diplomová práce. Velký dík patří zejména zaměstnancům technického oddělení, jmenovitě Eduardu Hégrovi za vstřícný přístup, věcné připomínky a poskytnuté materiály, které významně pomohly při zpracování dané problematiky.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- ✓ jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- ✓ беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- ✓ souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- ✓ bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- ✓ bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- ✓ беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- ✓ jsem se zavázal společnosti Edwards, s.r.o, že jimi poskytnuté informace budou použity pouze pro studijní účely a zpracování diplomové práce a nebudou sděleny jiným osobám jakoukoliv formou.

V Ostravě

.....

podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠTUDENT, D. Technická diagnostika suchých šnekových vývěv. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 85 s. Diplomová práce, vedoucí Blata, J.

Diplomová práce řeší především problematiku kontroly jakosti vývěv XDS. Počáteční kapitoly diplomové práce byly věnovány úvodu do vakuové problematiky. Získané informace jsou uplatňovány především při hodnocení vývěv XDS s konkurenčními.

Dále se diplomová práce zabývá aplikací vibrodiagnostiky na kontrolu jakosti vývěv XDS. Kromě samotného proměření vývěvy, byl proveden také její teoretický rozbor se stanovením možných poruchových frekvencí. Pozornost byla rovněž věnována současnému systému měření vibrací na výrobní lince a jeho případnému zlepšení. Měření vibrací bylo v samotném závěru práce doplněno také o akustické měření v polobezodrazové komoře.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

ŠTUDENT, D. Technical Diagnostics of Dry Scroll Vacuum Pumps. Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 85 p. The diploma thesis, head Blata, J.

This diploma thesis mainly solves questions about quality control of XDS pumps. The initial chapters of thesis are dedicated to introduction of vacuum issues. Obtained information are mainly applied at the evaluation of XDS pumps with competitive products.

Furthermore the thesis deals with an application of vibrodiagnostics on XDS pumps. Beside practical measurements of the pump, a theoretical analysis of possible failure rate was made as well. An attention is also given to current system for measuring vibration on the production line and its possible improvement. The measurement of vibration is complemented on the acoustic measurements in hemi-anechoic chamber in the end of diploma thesis.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1. Úvod:	9
2. Vakuum – základní pojmy:	10
2.1. Definice a klasifikace vakua:	10
2.2. Jednotky:	10
2.3. Využití vakua:	11
3. Rozdělení vývěv:	12
3.1. Vývěvy adsorpční:	12
3.2. Vývěvy mechanické:	14
3.2.1. Vývěvy přímočaré:	14
3.2.2. Vývěvy rotační:	16
3.3. Hybnostní vývěvy	22
4. Edwards a jeho konkurence:	26
4.1. Představení společnosti Edwards:	26
4.2. Konkurence společnosti v oblasti menších suchých vývěv:	26
4.3. Zákaznické požadavky na vývěvy:	28
4.4. Porovnání řady XDS s konkurencí:	28
5. Vliv vibrací a hluku na zdraví člověka:	34
5.1. Vliv vibrací na člověka:	34
5.2. Vliv hluku na člověka:	35
6. Konstrukce a popis měřené vývěvy XDS 10:	38
7. Očekávané závady vývěvy a jejich možný projev ve vibračním spektru:	40
7.1. Nevyváženost:	40
7.2. Špatné ustavení scrollu:	41

7.3.	Závady ložisek:	41
7.4.	Elektricky buzené vibrace:	43
8.	Analýza současného systému měření vibrací na výrobní lince:	45
8.1.	Používané zařízení k měření vibrací:	45
8.2.	Zhodnocení procesu měření vibrací na výrobní lince:	47
9.	Možný vliv vybraných vnějších činitelů na měření vibrací na výrobní hale:	49
9.1.	Měření vibračního pozadí na výrobní hale:	49
9.2.	Analýza stolu pro měření vibrací:	50
9.2.1.	Analytická modální analýza stolu v programu Autodesk Inventor:	51
9.2.2.	Experimentální určení rezonančních frekvencí – Bump test:	52
9.2.3.	Porovnání a vyhodnocení výsledků obou metod:	54
10.	Měření vibrací na XDS 10	56
10.1.	Použité vybavení pro analýzu vibrací:	56
10.2.	Volba upevnění a umístění snímače vibrací:	57
10.3.	Porovnání výsledků z jednotlivých měřených bodů:	59
10.4.	Hodnota vibrací dle ČSN ISO 10816:	60
10.5.	Vyhodnocení spekter:	61
11.	Měření hlučnosti vývěvy dle ČSN ISO 3745:	67
11.1.	Použité vybavení:	67
11.2.	Postup měření:	68
11.3.	Vyhodnocení hlučnosti vývěvy:	68
12.	Závěr:	72
13.	Použité zdroje:	74
14.	Seznam příloh:	76

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka – veličina	Význam	Použitá jednotka
MHZP	Míra hodnoty pro zákazníka	[-]
w	Váha atributu jakosti	[-]
w _Q	Váha prvku jakosti	[-]
w _C	Váha prvku ceny	[-]
U _Q	Ukazatel jakosti vnímaný trhem	[-]
U _C	Ukazatel míry cenové konkurenční schopnosti	[-]
v	Rychlost	[mm/s]
f	Frekvence	[Hz]
BPFI	Poruchová frekvence vnitřního kroužku	[Hz]
BPFO	Poruchová frekvence vnějšího kroužku	[Hz]
BSF	Poruchová frekvence valivých elementů	[Hz]
FTF	Poruchová frekvence poškození klece	[Hz]
F _p	Frekvence průchodu pólů	[Hz]
RBPF	Frekvence průchodu rotorových tyčí	[Hz]
FFT	Rychlá Fourierova transformace	[-]
L _p	Hladina akustického tlaku	[dB]
L _{pi}	Dílčí hladiny akustického tlaku	[dB]
L _w	Hladina akustického výkonu	[dB]
L _{wi}	Dílčí hladiny akustického výkonu	[dB]
N	Počet měřených ploch	[-]
S	Obsah měřené plochy	[m ²]
S ₀	Referenční hodnota obsahu měřicí plochy (1 m ²)	[m ²]
W	Akustický výkon	[W]
W ₀	Referenční hodnota akustického výkonu (10 ⁻¹² W)	[W]

1. Úvod:

Vývěvy jsou základním prvkem vakuové techniky, která je technicko-vědním oborem zabývající se procesy při tlaku nižším, než je atmosférický. Za poslední tři desetiletí došlo v tomto oboru k velkému pokroku a dnes je již jen málo průmyslových odvětví, kde se nepoužívá vakuová technika alespoň nepřímo.

Asi prvním komerčně známým využitím vakua v praxi, je jeho aplikace v žárovkách. Zde sloužilo vakuum k zabránění chemické degradace žhaveného wolframového vlákna. Dnes je již tato aplikace minulostí a s využitím vakua se setkáme nejčastěji v potravinářství. Nejen že se využívá při balení potravin, ale také i při výrobě instantních káv, polévek apod. Jeho neméně časté využití je i v metalurgii, strojírenství a elektrotechnice.

Tato diplomová práce byla vypracována v úzké spolupráci školy se společností Edwards s.r.o., která je celosvětovým leaderem ve výrobě vakuové techniky. Bezesporu dlouhodobým cílem každé výrobní společnosti je nejen vykazovat zisk, ale také si udržovat a nejlépe ještě zlepšovat jakost svých produktů. Společnost Edwards v tomto ohledu není rozhodně výjimkou a výstupní jakosti jejich produktů je věnována velká pozornost.

K zajištění požadované jakosti se využívá především metod technické diagnostiky. Ta nám poskytuje celou řadu možností kontroly jakosti jednotlivých komponentů (nedestruktivní technická diagnostika) i již kompletních strojů (provozní technická diagnostika). Cílem technické diagnostiky je především odhalit nedokonalosti ve funkčnosti, bezpečnosti či spolehlivosti produktu. Správná aplikace metod technické diagnostiky na výrobek, přináší kvalitní produkci, finanční úspory a především spokojené zákazníky.

V této diplomové práci se budu zabývat především aplikací vibrodiagnostiky na daný typ vývěvy. Cílem práce je především analyzovat současné měření vibrací na výrobní lince, odhalit jeho případné nedostatky a určit nejběžnější poruchové frekvence vývěvy XDS 5/10. Praktická část práce je především věnována rozboru vibračního chování vývěvy XDS 10, která byla škole darována firmou Edwards, pro pokusné účely.

2. Vakuum – základní pojmy:

2.1. Definice a klasifikace vakua:

Vakuum (z lat. *Vacuu*s - prázdný) znamená prostor, v němž je tlak plynu nižší než při normálním atmosférickém tlaku. Často se stává, že lidé mají sklon nazývat tlak nižší než atmosférický jako tlak záporný. To je však omyl. Záporný tlak neexistuje, už jen nulový tlak je spíše hypotetickou situací, protože abychom ho dosáhli, museli bychom mít absolutně prázdný prostor bez jediné molekuly. Je prokázáno, že i ve vesmíru není dokonalé vakuum.

Z praktických důvodů se vakuum definuje do několika stupňů. Tyto stupně jsou však jen orientační, nejsou nijak normované.

1. stupeň...nízké vakuum 10^{-1} až 10^{-2} Pa
2. stupeň...vysoké vakuum 10^{-2} až 10^{-7} Pa
3. stupeň...ultravysoké vakuum 10^{-7} až 10^{-10} Pa
4. stupeň...extrémně vysoké vakuum $< 10^{-10}$ Pa

Nejnižší hodnota vakua dosažená v laboratorních podmínkách na zemi činí okolo 10^{-11} Pa. Pro představu na měsíci je tlak okolo 10^{-9} Pa. V hlubším vesmíru tlak klesá až na hodnotu okolo 10^{-22} Pa.

2.2. Jednotky:

Základní jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Jeden Pascal je tlak, který vyvolá síla 1 newtonu rovnoměrně rozložená na ploše jednoho čtverečního metru. Avšak jen s touto jednotkou nevystačíme. Stejně tak jako je ve zvyku u hydraulických systémů používat místo jednotek *MPa* spíše jednotku *bar*, tak i ve vakuové technice se častěji setkáme s *mbary* nebo *torry*.

Torr (1 Torr = 1 mmHg) - jedna z nejstarších jednotek pro vyjádření tlaku, stále se však používá v USA a v Japonsku.

$$1 \text{ Torr} = 133.3 \text{ Pa}, 1 \text{ Pa} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$$

mbar – jednotka odvozená od jednotky bar, je často používá v Evropě, především v německy mluvících zemích.

$$1 \text{ millibar} = 100 \text{ Pa} = 0.75 \text{ Torr}$$

V rámci jednotek tlaku se můžeme setkat ještě s dalšími jednotkami, které se však ve vakuové technice nepoužívají.

Tab 1. Konverze jednotek tlaku:

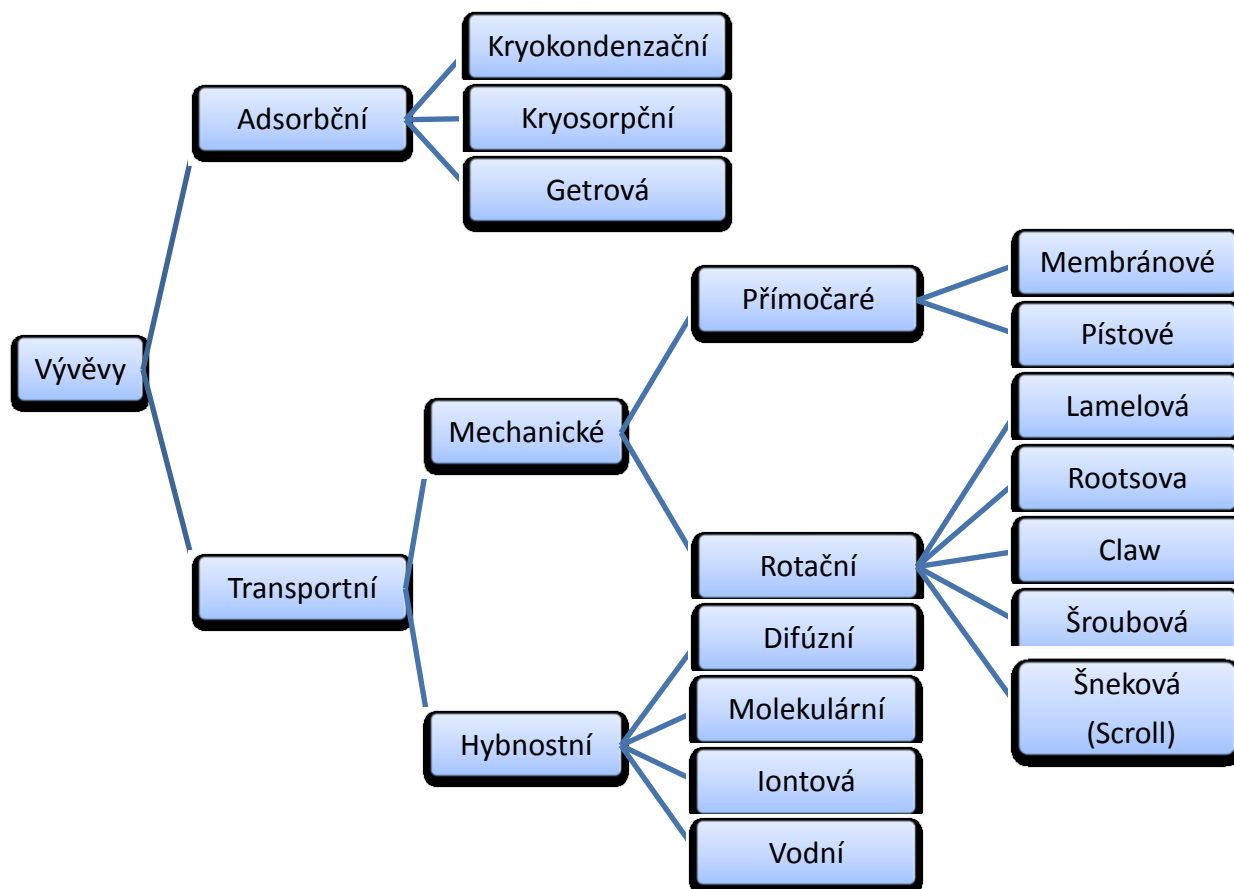
	Pa	torr	atm	bar	psi
Pa	1	$7.5006 \cdot 10^{-3}$	$9.8692 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1.4504 \cdot 10^{-4}$
torr	133.322	1	$1.3158 \cdot 10^{-3}$	$1.3332 \cdot 10^{-3}$	$1.9337 \cdot 10^{-2}$
atm	$1.01325 \cdot 10^5$	760	1	1.01325	14.69595
bar	$1 \cdot 10^5$	750.06	0.98692	1	14.5038
psi	6894.76	51.715	0.068046	0.068948	1

2.3. Využití vakua:

Vakuum dnes nachází využití v celé řadě technologických operací. Většina z nás přichází každodenně do styku s výrobky, které byly vytvořeny za pomoci vakua a nemá o tom ani tušení. Každého asi napadne využití ve výzkumu apod., to zajisté, ale setkáme se s ním také v:

- Potravinářství
 - Vakuové balení jídla, výroba dehydratovaných výrobků, jako jsou instantní polévky, instantní káva, sušené mléko atd.
- Elektroprůmysl
 - elektrická izolace, výroba elektronek a obrazovek, nanášení tenkých tištěných spojů atd.
- Hutní průmysl
 - Vakuové pece jsou používány při výrobě nových materiálů (tavení, slévání...), pro odstranění materiálového pnutí po tvářecích procesech, odplynění povrchu materiálů atd.
- Strojírenství
 - Mechanické manipulátory, nanášení tenkých vrstev a povlaků (skla, čočky) atd.
- Laboratorní technika
 - Zde se využívají k vakuovým destilacím a filtracím, zahušťování/kondenzaci vodných roztoků, dále také u elektronových mikroskopů, hmotnostních spektrometrů, urychlovačů částic atd.

3. Rozdělení vývěv:



Obr. 1. Rozdělení vývěv

Mechanické vývěvy si můžeme také rozdělit na suché a mokré (olejové).

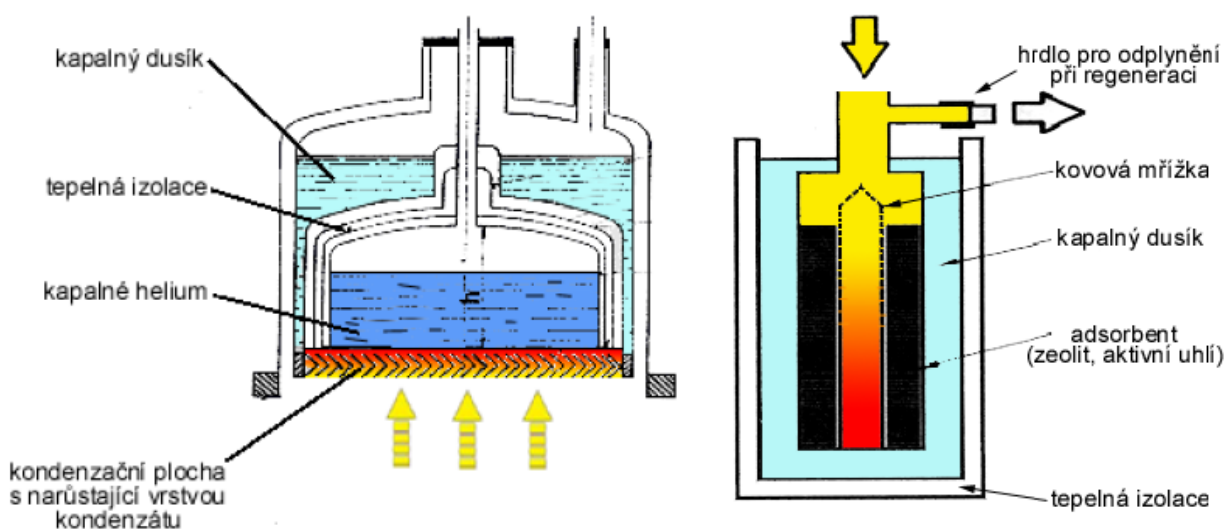
3.1. Vývěvy adsorpční:

Adsorpční vývěvy se vyznačují především tím, že odsávaný plyn neopouští vývěvu, nýbrž se váže uvnitř čerpaného prostoru. Adsorpční vývěvy se používají pro vytvoření vysokého stupně vakua (pod 10^{-10} Pa), tudíž vždy před použitím adsorpční pumpy musí být vždy nejprve vytvořeno vakuum nižší např. pomocí mechanické vývěvy, jinak by došlo k nasycení dříve, než by vůbec nějaké vakuum vzniklo.

Kryovývěvy:

Jsou to moderní, neustále se zdokonalující vývěvy pro dosažení čistého vakua až ultravakua pomocí nízkých teplot. Nízká teplota je dosažena použitím tekutého dusíku případně pomocí tekutého helia.

Obvyklá kryokondenzační vývěva je tvořena dvěma nádobami, vzájemně oddělenými, obsahující kapalný dusík a helium. Vnější nádoba je naplněna kapalným dusíkem a tepelně izoluje vnitřní nádobu naplněnou kapalným heliem. Nádoba s kapalným heliem je spojena s kondenzační plochou, která zasahuje do vakuovaného prostoru. Na této ploše pak kondenzují molekuly zbytkového plynu a tlak ve vývěvě klesá. Tyto molekuly se na kondenzační ploše postupně hromadí, tvoří se tuhý kondenzát, což má za následek horší tepelnou vodivost resp. nižší účinnost vývěvy s postupujícím čerpacím cyklem. Po skončení cyklu se vývěva odstaví a ohřeje se. To má za následek uvolnění kondenzační plochy (desorpce) [1].



Obr. 2. Schéma kryokondenzační vývěvy a kryosorpční vývěvy [1].

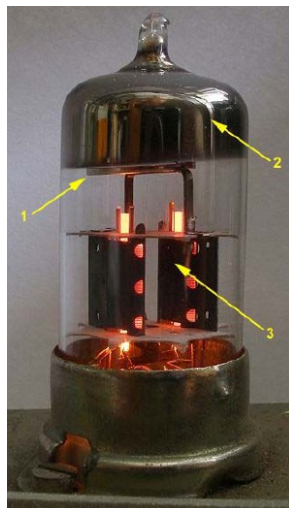
Pro zvýšení efektivity se namísto hladkých kondenzačních ploch používají materiály schopné absorbovat plyn ve svých dutinách, jako například zeolity, což jsou materiály na bázi oxidů. Vývěvy využívající těchto materiálů nazýváme jako kryosorpční.

Všechny kryovývěvy jsou v podstatě jednoduché, bez pohyblivých částí. Kromě odplynění nepotřebují údržbu a mají tak neomezenou životnost. To však neplatí u nutného příslušenství kryovývěv, protože kapalný dusík ani helium nejsou nejlevnější záležitostí. Proto je nutno pamatovat, že čím vyššího ultravakua chceme dosáhnout, tím nižších teplot musíme použít a tím také vzrůstají i náklady.

Getrová vývěva:

Getr je látka přidávající se například do elektronek nebo osvětlovacích trubic za účelem pohlcení zbytků plynů, které nebyly zcela odsáty vývěvou. Getrovací látka tak

zlepšuje vakuum nebo čistotu plynu v evakuovaném prostoru. Getrovací látka, obvykle baryum, titan, hliník nebo hořčík, se indukčním ohřevem odpaří a pohltí zbytky plynů. Getrové páry jsou v činnosti jen malý okamžik a pak se usadí v tuhém skupenství jako tzv. getrové zrcátko.



Obr. 3. Dvojitá trioda v provozu: 1...kroužek s getrovací látkou (Ba) 2...getrové zrcátko, 3...elektronka [1].

3.2. Vývěvy mechanické:

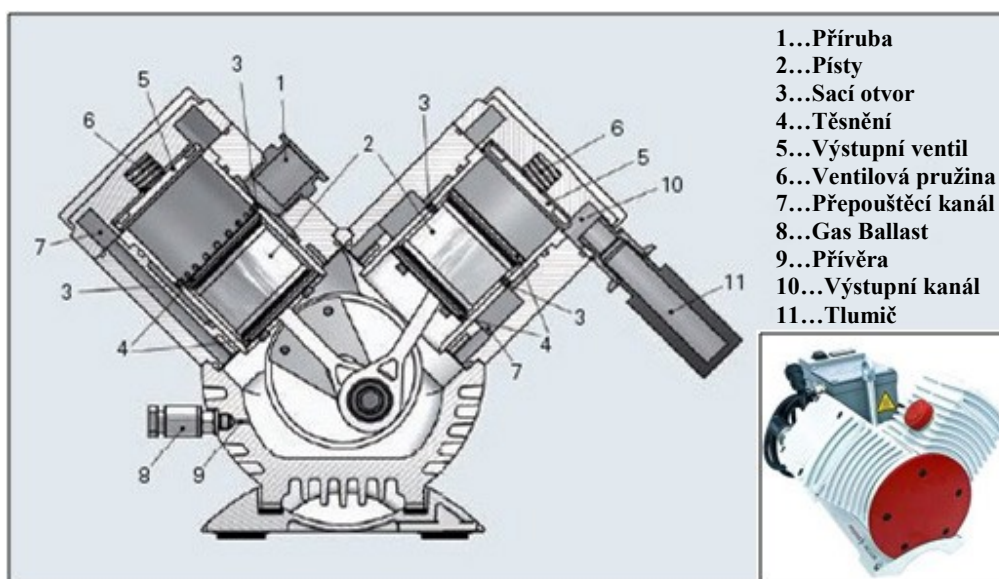
3.2.1. Vývěvy přímočaré:

Mezi vývěvy, jejichž základním principem je konání přímočarého vratného pohybu, řadíme především vývěvy pístové a membránové.

Pístové vývěvy:

Pístové vývěvy patří konstrukčně mezi nejstarší. Čerpání plynu je docíleno pomocí přímočarého vratného pohybu, který koná píst ve válci.

Hlavními problémy těchto vývěv je nutnost vstupních a výstupních ventilů, které jsou většinou samočinné (výjimečně s šoupátkovým rozvodem), a poměrně velký nevyčerpatelný prostor (škodlivý prostor okolo ventilů). Z těchto důvodů se pístové vývěvy konstruují několikastupňové pro větší účinnost čerpání a vytvoření vyššího stupně vakua. Písty a válec jsou vyrobeny v nejmenších možných tolerancích a je na ně nanášen speciální materiál např. polytetrafluorethylen, který umožňuje pracovat vývěvě jako suché, bez nutnosti mazání.

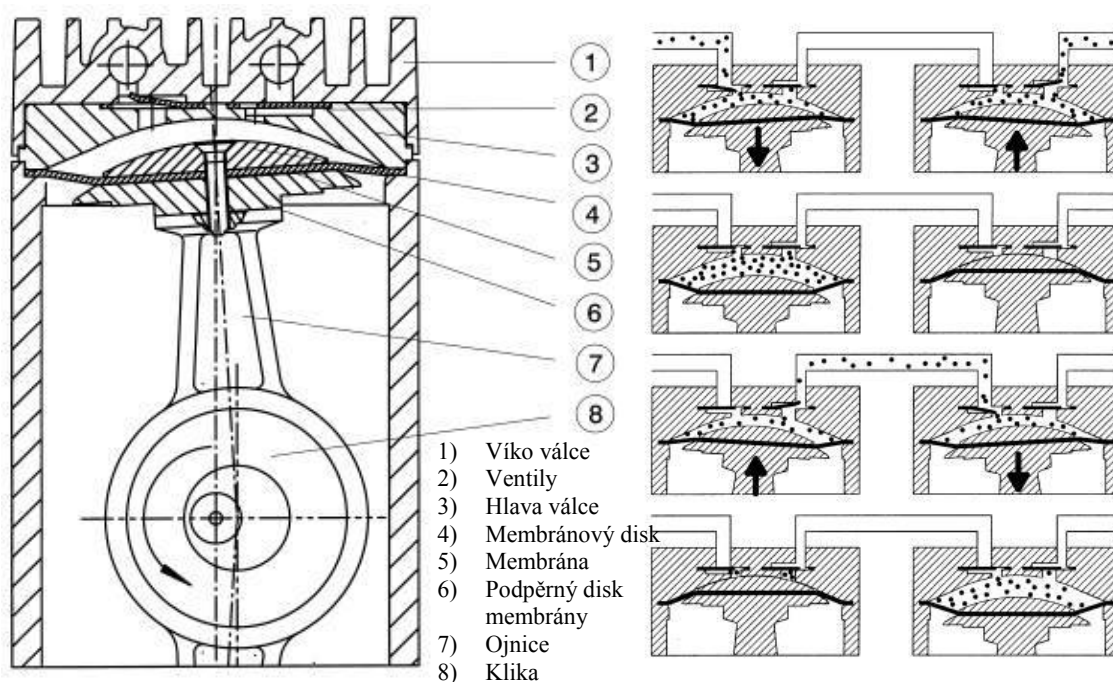


Obr. 4. Pístová vývěva Pfeiffer XtraDry 150 [2].

Membránové vývěvy:

Tento typ pístové vývěvy je velmi rozšířen v laboratořích a provozech kde je potřeba dosahovat nižších hodnot vakua (cca 1000 Pa) a není rovněž vyžadován velký čerpací výkon. Mezní tlak je limitován především tlakem, kdy dojde ještě k otevření vstupního ventilu do vývěvy. Tyto vývěvy se také často využívají k vytvoření tzv. předvakua pro turbomolekulární a Rootsovy vývěvy, které nejsou schopny pracovat už od atmosférického tlaku. Rovněž se využívají pro čerpání agresivních a korozivních plynů, ovšem jen za předpokladu, že je membrána vyrobena z chemicky stálého materiálu jako např. teflon.

Tyto vývěvy se stejně jako pístové mohou vyrábět jako několikastupňové, mohou se zapojit do série, což má za následek nižší mezní tlak, nebo se mohou zapojit paralelně pro zvýšení čerpací rychlosti. Velkou výhodou těchto vývěv je pořizovací cena, ale na úkor spolehlivosti a nutnosti poměrně časté výměny membrány.

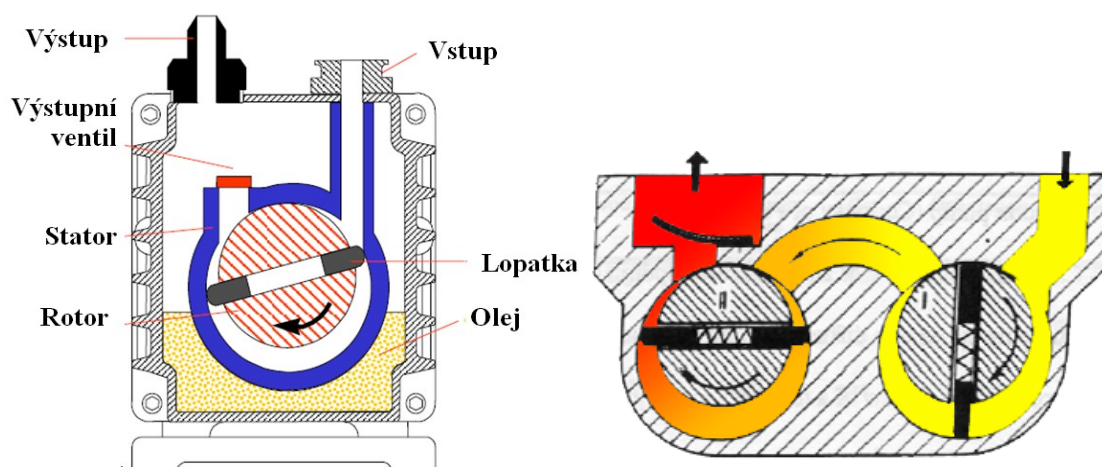


Obr. 5. Konstrukce membránové vývěvy a schéma činnosti dvojstupňové membránové vývěvy [3].

3.2.2. Vývěvy rotační:

Lamelové vývěvy

Lamelové rotační vývěvy jsou pravděpodobně nejpoužívanějším typem vývěv v technologické a laboratorní oblasti. Pracují na principu excentricky uloženého rotoru, do nějž jsou volně zasazeny lopatky.



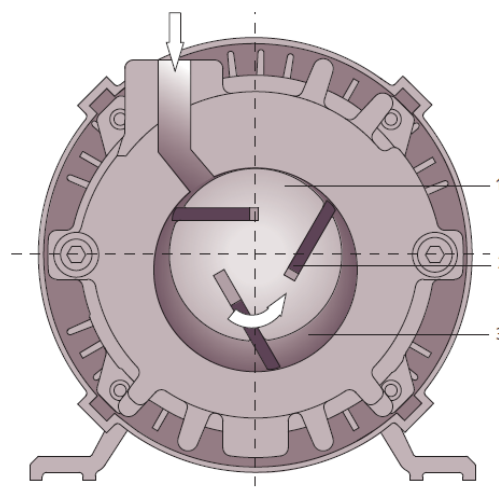
Obr. 6. Zjednodušené schéma rotační lopatkové vývěvy a schéma dvojstupňové rotační lopatkové vývěvy [4], [1].

Olej v těchto vývěvách slouží pro lepší skluz lopatek v rotoru, lepší odvod tepla uvolněného při stlačování plynu, chrání proti korozi, ale především utěsňuje prostor mezi lopatkami a statorem. Jelikož ve vývěvě dochází ke kompresi čerpaného plynu, může se stát, že se některé čerpané látky (vodní páry) rozpustí v oleji, znehodnotí jej a dostanou se do systému. Z těchto důvodů je nutné používat speciální oleje a tam kde je to nutné použít pomocný ventil tzv. gas ballast. Tento ventil po otevření přisává suchý vzduch o atmosférickém tlaku, většinou mezi pracovní stupně vývěvy, a neumožní hromadění kondenzátu. Tento systém s proplachováním má však za následek snížení účinnosti – mezního tlaku. Tlak v těchto vývěvách se pohybuje až okolo 0,1 Pa s gas ballastem tlak stoupá na jednotky pascalů.

Čerpací rychlost těchto vývěv je poměrně vysoká, dají se řadit do série (vícestupňové vývěvy – snížení tlaku až o dva řády) a jejich výhodou je také kontinuita čerpání. Avšak jejich velkou nevýhodou je možnost kontaminace evakuovaného prostoru olejem. Pokud hodláme tyto vývěvy používat v laboratořích, tak musíme dbát na to, aby do vývěvy nevnikly organické nečistoty či korozivní látky. V takovém případě dojde k jejímu zadření či úplnému zničení [1].

Zvláštní variantou jsou rotační lamelové vývěvy suché, konstrukčně jsou téměř stejné jako olejové, akorát mají více lopatek, které jsou vyrobeny ze speciálního uhlíkového materiálu. Absence oleje v pracovní komoře má za následek výrazné zhoršení mezního tlaku na hodnotu okolo 15000 Pa, nutnost použití silnějšího elektromotoru (vyšší provozní náklady), větší opotřebení lopatek (častá a drahá výměna). Tyto pumpy jsou navíc poměrně poruchové (u větších modelů se velmi často lámou lopatky).

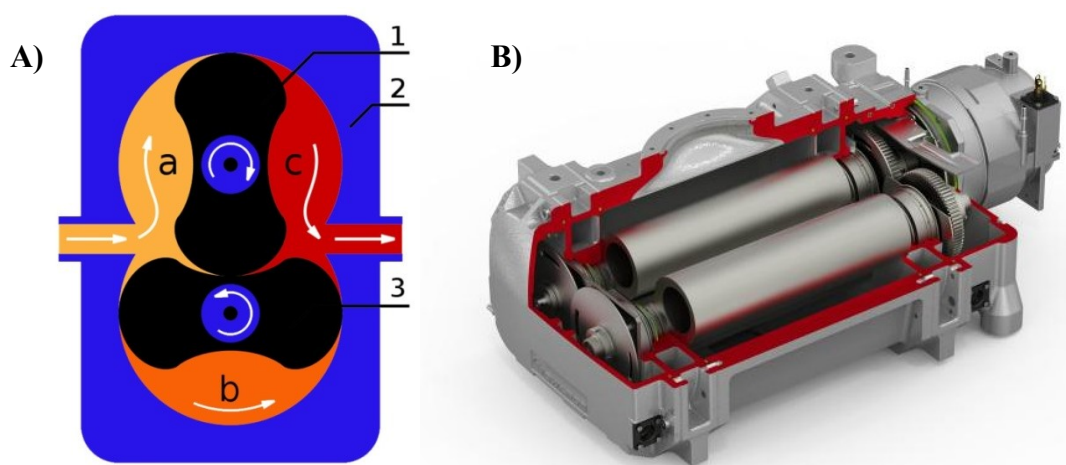
Obr. 7. Schéma suché lamelové vývěvy
Busch Seco SV 1005
1...Rotor, 2...Lopatka,
3...pracovní prostor vývěvy [5]



Rootsovy vývěvy

Rootsov mechanismus je pravděpodobně širší veřejnosti znám spíše z kompresorové techniky, kde je určitě nejpoužívanějším zubovým kompresorem.

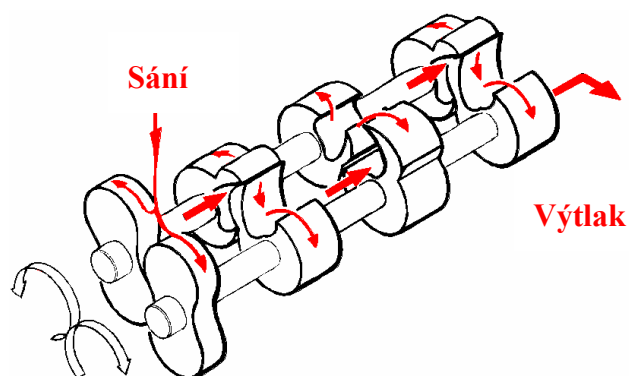
Dva rotory se v pracovním válci otáčejí proti sobě někdy rychlostí až několika tisíc otáček za minutu. Sací a výtlačné hrdlo ústí do pracovního prostoru mezi osami rotorů. Mezi stěnou válce a rotory se vytváří prostory spojené buď se sáním, výtlakem nebo prostory uzavřené, kdy je odsávaný plyn dopravován mezi stěnou tělesa a rotorem ze strany sací na stranu výtlačnou.



Obr. 8. A) Princip činnosti Rootsovy vývěvy, 1 a 3... lopatka, 2... těleso vývěvy, a...sání, b...přemisťování plynu, c...výtlač, B) Booster Edwards EH

Tyto vývěvy se provádí od poměrně malých až po velmi velké (několik tun), jejich velkou předností je vysoká čerpací rychlost (až tisíce litrů za minutu). Jejich nevýhodou je že nemohou pracovat samostatně. Pro svou činnost potřebují předvakuum, protože nejsou schopné vytlačit najednou tak velké množství vzduchu.

Tyto vývěvy patří mezi vývěvy suché, mohou se řadit do série či paralelně a jejich rotory mohou mít kromě klasického tvaru i tvar šroubovic. Dnes se můžeme setkat i s kombinací Rootsovi vývěvy s tzv. claw (klepítková, drápová) vývěvou, která jí je velmi podobná.

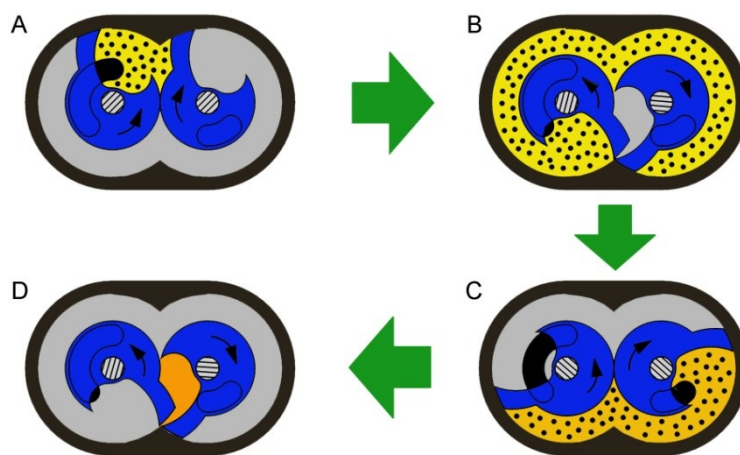


Obr. 9. Kombinovaná Roots - claw vývěva [6].

Výhoda této kombinované vývěvy je v tom, že „claw stupně“ vytvoří předvakuum a Rootsův stupeň výrazně zvýší čerpací rychlost a mezní tlak, oproti celé claw vývěvě.

Claw vývěvy

Jak již bylo zmíněno, tak Rootsova a claw vývěva jsou si velmi podobné. Mají stejný tvar statoru, ale rotory mají tvar drápků (klepítek). Od Rootsovy vývěvy se však neliší pouze tvarem rotoru. Dalším rozdílem je to, že u Rootsovi vývěvy je sací i výtlačný kanál stále otevřen, avšak u claw vývěvy jsou kanály otevírány a zavírány pomocí rotorů, tudíž můžeme hovořit o šoupátkovém rozvodu. Dalším velkým rozdílem je, že u tohoto typu vývěvy dochází ke stlačování plynu ve vývěvě před expanzí do výtlačku.



Obr. 10. Pracovní cyklus claw vývěvy [6].

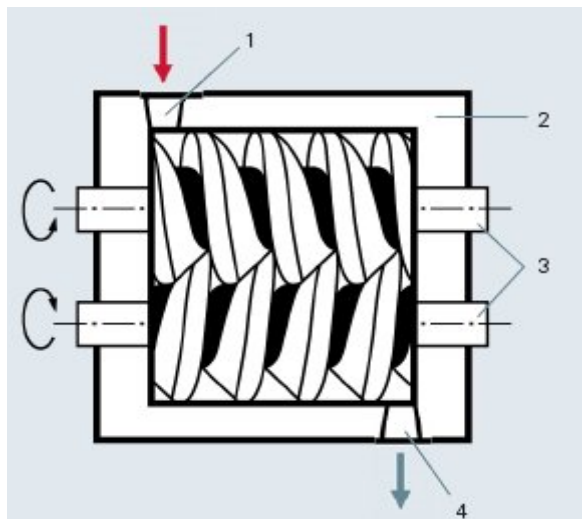
Na obr. 10a vidíme, že nám levé klepítko otvírá sací kanálek a dochází k nasávání čerpaného plynu. Zhruba po půl otáčce (obr. 10b) dojde k zaplnění celého pracovního prostoru čerpaným plynem. Po další půlotáčce (obr. 10c) vidíme, že dochází k pozvolnému

stlačování plynu a otevírá se sací kanálek. Na obr. 10c pracovní cyklus končí, klepítka do sebe zapadají, aby se vyfouklo co nejvíce čerpaného plynu, a začíná cyklus nový.

Můžeme se setkat i s vývěvou tohoto typu, která již nemá rotory ve tvaru klepítek, ale tvaru písmene S, což má za následek dva pracovní cykly během otáčky. Tento tvar nepřináší nikterak vyšší čerpací výkon, ale spíše kontinuitu čerpání a větší symetričnost rotoru (vibrace, hluk).

Šroubové vývěvy

Principiálně jsou velmi jednoduché, skládají se ze dvou otáčejících se rotorů, ty se otáčejí v opačných směrech a tak je plyn trvale otevřeným sacím kanálem nasáván do komůrek mezi rotory, postupně stlačován a trvale otevřeným výtlačným kanálem vyfukován.



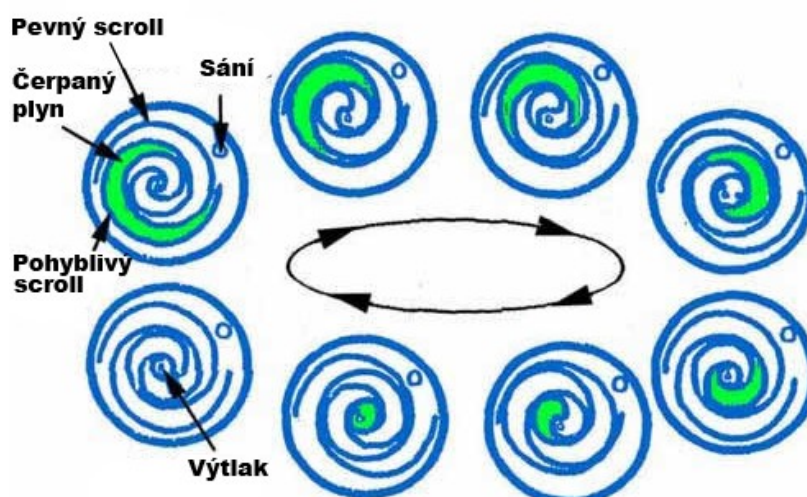
Obr. 11. Schéma šroubové vývěvy,
1...sací kanál, 2...těleso vývěvy,
3...rotory, 4...výfukový kanál [2].



Obr. 12. Rotory Edwards GXS
s proměnlivým stoupáním pro větší
účinnost [6].

Šnekové vývěvy (Scroll)

Jsou jedny z nejpoužívanějších suchých vývěv, které se vyznačují především vysokou čerpací rychlostí, dobrým mezním výkonem a kompaktní konstrukcí. Naopak jsou citlivé na tuhé částice, které může obsahovat čerpaný plyn. Jsou náročné na přesnou montáž a mají vyšší provozní náklady spojené s nutnou periodickou výměnou těsnění mezi scrolly.



Obr. 13. Princip spirálové činnosti vývěvy [6].

Princip vývěvy je ten, že na rotoru i statoru jsou vystouplé spirály (scrolly), které jsou v sobě vsazeny s velmi malou vůlí, nedotýkají se. Rotor koná excentrický pohyb, který je vymezen vzdáleností sousedících spirál. Tímto pohybem je plyn nasáván mezi spirály a postupně se s každou otáčkou rotoru posouvá směrem ke středu, kde je vytlačen z vývěvy ven.

Kromě klasických jednoduchých konstrukcí se můžeme setkat i s dvoustupňovými. Jejich rotor má spirálu z obou stran a zapadá do dvou statorových scrollů, z nich může jeden být osazen hned trojitou spirálou viz obr.



Obr. 14. Dvoustupňová spirálová vývěva Oerlikon Leybold SC 60 D [3].

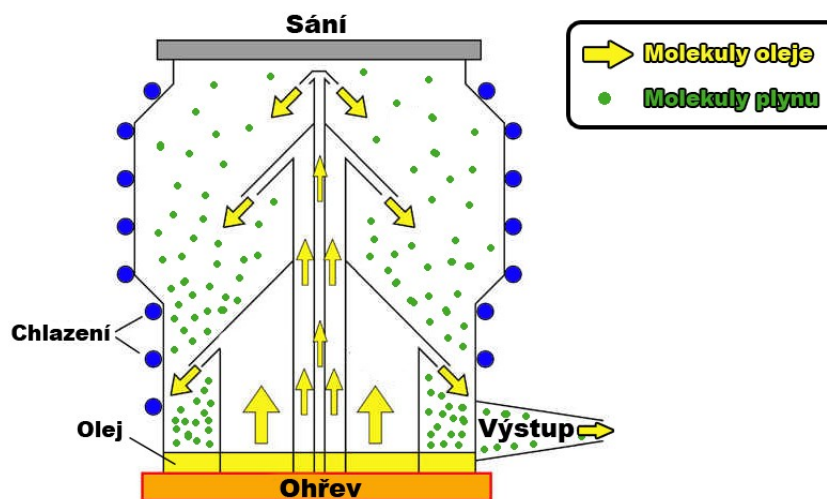
Tento typ vývěv se hodí například k předčerpání turbomolekulárních vývěv, jsou také vhodné k nejrůznějším výzkumným a vědeckým aplikacím. Nalezneme je u hmotnostních spektrometrů, elektronových mikroskopů, laserů a obecně u všech čistých bezolejových aplikací.

3.3. Hybnostní vývěvy

Difúzní vývěva

Tento typ vývěvy je velmi používaný v technice vysokého vakua a při vhodné pracovní kapalině lze dosáhnout až ultravakua.

Tato vývěva nemá žádné pohyblivé části, skládá se z varné části, kde je elektrickým proudem zahřívána k varu pracovní tekutina (olej nebo rtuť) a její páry jsou vedeny tryskou do prostoru vývěvy. Směr proudění těchto par je shodný se směrem proudění čerpaného plynu. Čerpaný plyn difunduje do par pracovní tekutiny a tato směs je pak vedena do prostoru, kde zkondenzuje pouze pracovní tekutina (a stéká zpět do varné části) a čerpaný plyn je odveden primární vývěvou ze systému [1]. Aby tato vývěva správně fungovala je nutné její plášť chladit vodou.



Obr. 15. Princip difúzní vývěvy

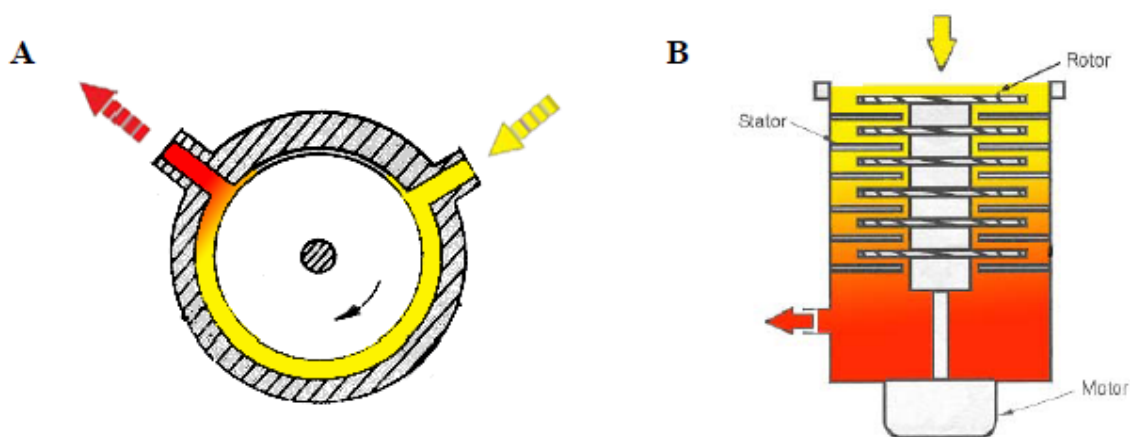
Tyto vývěvy nejsou schopny pracovat od atmosférického tlaku, potřebují poměrně velké předvakuum, které je většinou vytvořeno rotační olejovou pumpou. Čerpací rychlost těchto pump je poměrně nízká a tak dosažení mezního tlaku trvá někdy až desítky hodin. Hrozí zde i riziko kontaminace evakuovaného prostoru pracovní kapalinou. Jejich velkou

výhodou je nízká cena, konstrukční jednoduchost, odolnost a především schopnost čerpat jakýkoliv plyn.

Molekulární a turbomolekulární vývěva

Principiálně je tento typ vývěv poměrně jednoduchý. Vývěva se skládá ze statoru, v kterém je asymetricky umístěn rotor. Tento rotor je v případě molekulární vývěvy zcela hladký bez jakýchkoliv lamel apod. Tento rotor se otáčí velmi vysokými otáčkami (cca od 30000 ot/min) a jeho hřídel bývá uložena v magnetickém uložení (rotor udržuje ve stálé poloze silné magnetické pole), případně jsou používána i keramická kluzná ložiska.

Molekuly čerpaného plynu vstupují do vývěvy přes sací kanál a dopadají na rychle se otáčející se rotor, který jim dodá impuls ve směru jeho tečny. Tato srážka molekuly s rotorem zapříčiní její pohyb ve směru čerpání plynu. Hraniční tlak těchto vývěv se pohybuje okolo hodnoty 10^{-4} Pa, avšak čerpací výkon těchto vývěv je poměrně nízký, což vedlo k její modifikaci – turbomolekulární vývěvě.



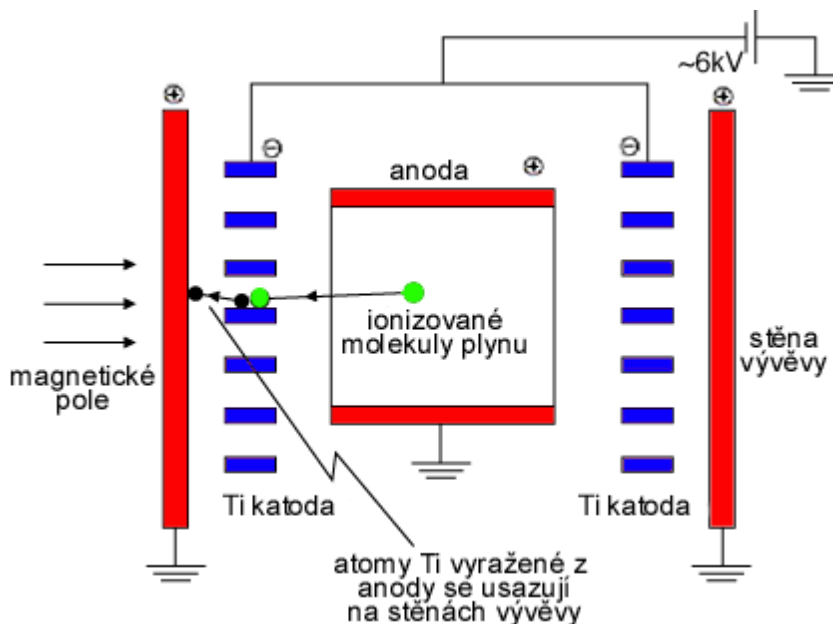
Obr. 16. **A)** Schéma molekulární vývěvy, **B)** Schéma turbomolekulární vývěvy [1].

Turbomolekulární vývěva pracuje na obdobném principu, s tím rozdílem, že molekuly plynu urychluje rotor s několika disky řazenými do série. Tato konstrukční modifikace měla za následek zvětšení čerpacího výkonu a mezní tlak klesl na hodnotu okolo 10^{-11} Pa.

Tyto vývěvy jsou náročné na výrobu, což má za následek vyšší pořizovací cenu, musí být vytvořeno předvakuum sekundární vývěvou, neboť čerpání plynu od atmosférického tlaku by mělo za následek přehřátí lopatek a jejich deformaci. Nicméně tyto vývěvy poskytují velmi čisté vakuum bez oleje a jsou velmi oblíbené pro použití např. u spektroskopických zařízení a elektronových mikroskopů.

Iontová vývěva

U iontových vývěv je aktivním čerpacím prvkem titanová katoda. Základními prvky této vývěvy jsou již zmíněné titanové katody, trubicová anoda a magnetické pole, vyvolané z pravidla pomocí ornamentálních feritových magnetů.



Obr. 17. Schéma iontové vývěvy [1]

Na anodu přivedeme vysoké napětí v řádech kW, to má za následek elektrický výboj, který rozprašuje materiál elektrod a okolí. Rozprašený elektron je při srážce s molekulami čerpaného plynu ionizován a vzniklé ionty jsou strhávány ke katodám, kde se adsorbují na povrchu titanu. Abychom docílili větší pravděpodobnosti srážky elektronu s molekulou čerpaného plynu, je výboj realizován v magnetickém poli, které je kolmé k elektrodám. To má za následek pohyb elektronů po šroubových drahách. Účinnost vývěvy je dále zvyšována tím, že titan je rozprašován a zachycuje se na ostatních částech vývěvy, kde na sebe váže zbytky čerpaných plynů [1].

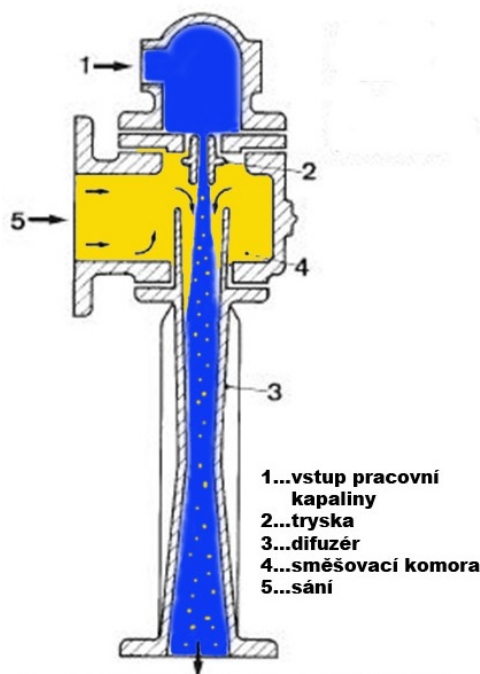
Iontové vývěvy mohou pracovat v jakékoli poloze, mohou se proto zabudovat do bezprostřední blízkosti pracovního prostoru vakuových přístrojů. Optimální tlak pro iontové vývěvy se pohybuje okolo 10^{-5} Pa. Čerpací rychlost klesá asi na polovinu při dosažení tlaku 10^{-8} Pa. Tyto vývěvy potřebují předčerpání, neboť při vyšším tlaku vzniká velký ztrátový výkon. Tyto vývěvy se vyznačují minimální údržbou a velkou životností až do 50000 hod.

Vodní vývěva

Tato vývěva je též nazývána ejektorová a pracuje na principu strhávání molekul čerpaného plynu ve směru toku pracovní kapaliny.

Přívodem 1 je do trysky 2 přiváděna pracovní kapalina, většinou voda, ale můžeme se setkat i se rtutí, silikonovým olejem či vodní párou, která následně proudí do difuzéru 3. V komoře 4 dochází k turbulentnímu mísení pracovní kapaliny s čerpaným plynem, který je jí následně odveden a tvoří se vakuum v sání 5.

Tyto vývěvy jsou levné, jednoduché avšak nedosahují nijak velkých čerpacích rychlostí ani mezních tlaků. Jejich použití je především v laboratorní technice.



Obr. 18. Schéma ejektorové vývěvy

4. Edwards a jeho konkurence:

4.1. Představení společnosti Edwards:

Společnost Edwards je jedním z předních výrobců vakuových technologií pro průmyslové, vědecké a polovodičové aplikace.

Tato firma pocházející z Anglie, kde byla v roce 1919 založena F. D. Edwardsem. V současnosti najdeme její pobočky nejen ve velké Británii, ale také například v USA, Izraeli, Singapuru či Japonsku, avšak mezi největší patří výrobní pobočka v Koreji a České republice.

Společnost Edwards vynalezla koncepci bezolejových vývěv a v současnosti jich má na trhu celou řadu, založených na různých principech. Dále společnost nabízí svým zákazníkům rotační lopatkové, difuzní a turbomolekulární vývěvy.

4.2. Konkurence společnosti v oblasti menších suchých vývěv:

I přes to jak specifickým oborem je vakuová technika, je jako v každém výrobním odvětví konkurence společnosti poměrně široká. Stručně se proto pokusím charakterizovat jen největší konkurenty na trhu v oblasti suchých vývěv.

- **Oerlikon Leybold Vacuum**

Společnost se zabývá vakuovou technikou již 150 let. Její hlavní centrála sídlí v Německu a v jejím sortimentu najdeme celou řadu vývěv pro tvorbu vysokého vakua, různé vakuové systémy, měřící techniku pro vakuové systémy atd. V oblast menších suchých vývěv firma nabízí zákazníkům na výběr z řad Divac (membránové), EcoDry (pístové) a Scrollvac (šnekové). Tato společnost je zcela určitě pro Edwards velkým konkurentem a to nejen v oblasti suchých vývěv, ale v celém svém sortimentu.

- **Busch**

Firma Busch se zabývá nejen výrobou vývěv, ale také dmychadel a kompresorů. Opět je to firma sídlící v Německu a její nabídka vývěv je velmi široká. V dané oblasti vývěv firma nabízí jako jedna z mála suché lamelové vývěvy Seco, které jsou levné, avšak poruchové s vysokými náklady na údržbu a především jejich mezní tlak je poměrně vysoký. Konkurence schopnějším produktem je řada šnekových vývěv Fossa a vývěva Mink (claw princip), avšak tato vývěva už je poměrně větší (sací výkon $62\text{m}^3/\text{h}$).

- **Pfeiffer**

Je další z řady Německých firem. Tato firma vyniká na trhu především výbornými turbomolekulárními vývěvami. Šnekové vývěvy byste v její nabídce hledali marně, avšak najdete tam pro menší čerpané objemy řadu membránových vývěv MVP a pro větší objemy řadu pístových vývěv XtraDry. Oba typy dosahují velmi konkurence schopných parametrů.

- **Varian**

Varian je firma pocházející z USA, který spojil své síly s Agilent Technologies, což je firma zabývající se výrobou laboratorní techniky (spektrometry, chromatografy, atd.). Firma opět nabízí principiálně několik typů vývěv, měřicí techniku, armatury a detektory úniku. Z produktů společnosti nás zajímají řady vývěv IDP, SH a Triscroll. Všechny tyto vývěvy pracují na šnekovém principu. Řada IDP se vyznačuje na šnekové vývěvy neobvykle malou čerpací rychlostí ($2,1\text{m}^3/\text{h}$).

- **ULVAC**

Je firma založená v Japonsku a její pobočky jsou rozesety po celé Asii. Společnost se zabývá všemi odvětvími vakuové techniky. V oblasti suchých vývěv firmu reprezentuje řady šnekových vývěv DIS a řady membránových vývěv DTC a DAL. Šnekové vývěvy DIS jsou v současnosti nakupovány od společnosti Anest Iwata (řada vývěv ISP).

- **Ebara Technologies**

Je to dceřiná společnost patřící pod koncern Ebara Group pocházející z Japonska. Tento koncern se skládá asi z 30 společností, a mezi veřejnosti asi nejznámější produkty patří velmi kvalitní čerpadla. Ebara Technologies se zabývá především výrobou suchých vývěv, turbomolekulárních vývěv a různým příslušenstvím. V porovnávané kategorii nabízí nyní Ebara vývěvy řady PDV pracující na šroubovém principu, které dosahují vynikajících parametrů. Ostatní série suchých vývěv jsou konstruovány pro vyšší čerpací rychlosti.

- **Anest Iwata**

Tato společnost se nesespecializuje striktně na vakuovou techniku. Doménou společnosti jsou lakýrnické pistole a lakýrnické systémy, kompresorová technika a v neposlední řadě tedy i suché vývěvy. V nabídce jsou šnekové vývěvy s označením ISP, z kterých vychází i další nabízené řady vývěv.

- **Alcatel Vakuum technology**

Tato firma má již 40 let zkušeností s vývojem a výrobou vakuové techniky. Produktová řada Adixen zahrnuje série vakuových vývěv, turbomolekulárních vývěv, hledačů netěsností a vakuometrů. Suché vývěvy Adixen jsou vyráběny jako membránové AMD či vícestupňové Rootsovy ACP. Tyto vývěvy mají velmi dobré funkční parametry a dlouhou životnost.

4.3. Zákaznické požadavky na vývěvy:

Jak již bylo řečeno, vývěvy se používají v mnoha naprosto odlišných aplikacích. Proto každý zákazník má různé priority pro výběr vývěvy dle jejího zamýšleného užití. Vlastnosti, podle kterých se může potencionální zákazník rozhodovat, jsou:

- Čerpací rychlost
- Mezní tlak vývěvy
- Vibrace a hluk vývěvy
- Spotřeba energie
- Rozměry a hmotnost
- Pořizovací cena
- Náklady na údržbu (nutný pravidelný servis atd.)
- Životnost a spolehlivost daného typu vývěvy
- Možnost čerpání agresivních látek
- Kontinuita čerpání

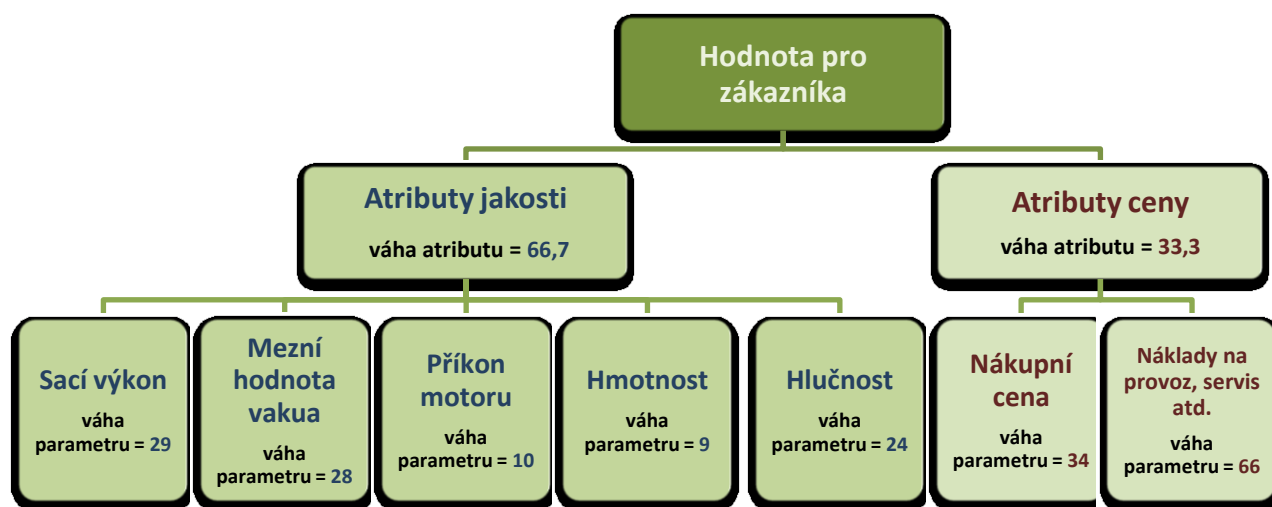
Avšak jako potencionální zákazník nemáte ke všem parametrům, které by Vás zajímaly přístup. Výrobci totiž uvádějí jen nutné parametry vývěv a cokoli dalšího, co by mohlo odhalit jejich know how, či naopak odhalit jejich slabiny, pečlivě skrývají. Pokud se chcete dozvědět něco navíc, musíte se obrátit na zákaznickou podporu a spoléhat na to, že daný výrobce je seriózní a uvede Vám pravdivé informace o svém produktu.

4.4. Porovnání řady XDS s konkurencí:

Porovnání vývěv XDS bylo provedeno na základě analýzy hodnot pro zákazníka. Pod tímto pojmem si můžeme představit hodnotu vnímanou zákazníkem, která je ovlivněna jím definovanou jakostí produktu a úrovní přijatelnosti ceny. Z čehož vyplývá, že hodnota pro zákazníka, je vždy stanovena na základ atributu jakosti a atributu ceny.

Jelikož toto porovnání slouží jen jako orientační, tak jsem při srovnávání vývěv a jejich hodnocení využil jen pár zaměstnanců firmy Edwards a několik nezaujatých lidí. Aby toto srovnání bylo průkazné, musel bych oslovit přímo několik desítek lidí, nejlépe odběratelů.

Na základě získaných dat jsem sestavil strom hodnot, který je tvořen parametry vývěv, které jsou volně dostupné všem potenciálním zákazníkům v katalogu výrobce.

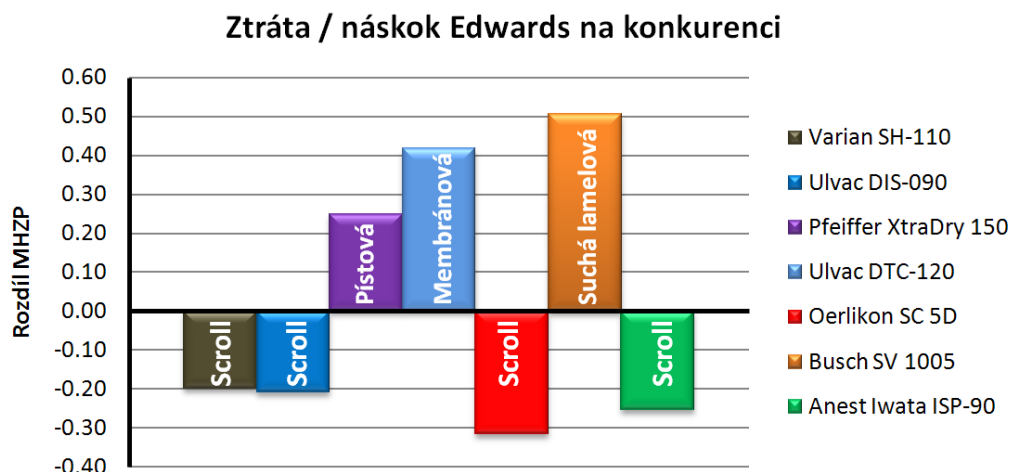


Obr. 19. Strom hodnot pro zákazníka

Srovnával jsem vývěvy, které jsou přímými konkurenty řad XDS v rámci rozdělení dle sacího výkonu. Rozdělení bylo tedy na vývěvy o sacím výkonu $\pm 5 \text{ m}^3/\text{h}$, $\pm 10 \text{ m}^3/\text{h}$ a 30 až 40 m^3/h (rozdělení a hodnocení vývěv viz příloha A). Podle tohoto rozdělení jsem pro vybraného výrobce stanovil dle [7] koeficient MHZP - míra hodnoty pro zákazníka, na jehož základě jsem prováděl následné vyhodnocení (výpočet viz příloha B).

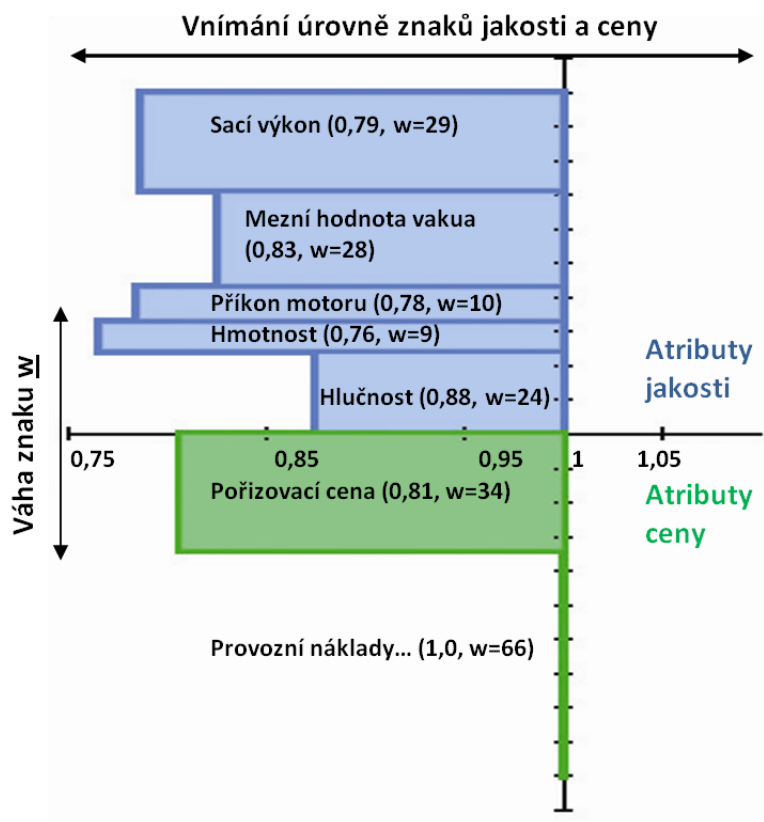
Konkurence XDS 5

V této kategorii se setkáváme s poměrně širokou nabídkou vývěv. A to především díky velkému výskytu membránových vývěv, které se nehodí pro větší čerpací rychlosti. Tyto vývěvy dosahují horších funkčních parametrů, avšak jsou konkurence schopné především svou cenou. Jako jejich zástupce jsem vybral dle mne nejkonkurenceschopnější membránovou vývěvu Ulvac DTC-120.



Obr. 20. Porovnání XDS 5 a konkurence

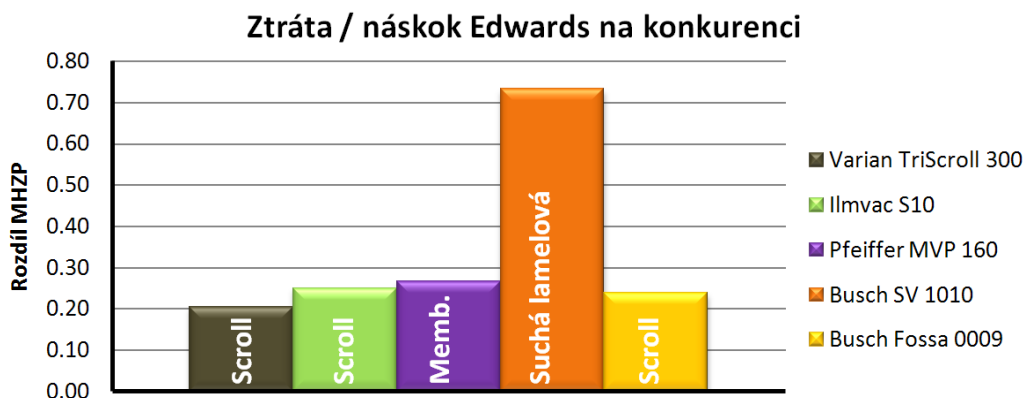
Z tohoto porovnání, které bylo vytvořeno na základě rozdílu $MH\dot{Z}P_{Edw.}$ a $MH\dot{Z}P_{kon.}$, je zřejmé, že nejvíce XDS 5 ztrácí na Oerlikon SC 5D, který je těsně následovaný zbylými šnekovými vývěvami. Konkrétní ztráty na Oerlikon, jakožto nejlepšího, nalezneme v následujícím grafu.



Obr. 21. Porovnávací graf hodnot pro zákazníka

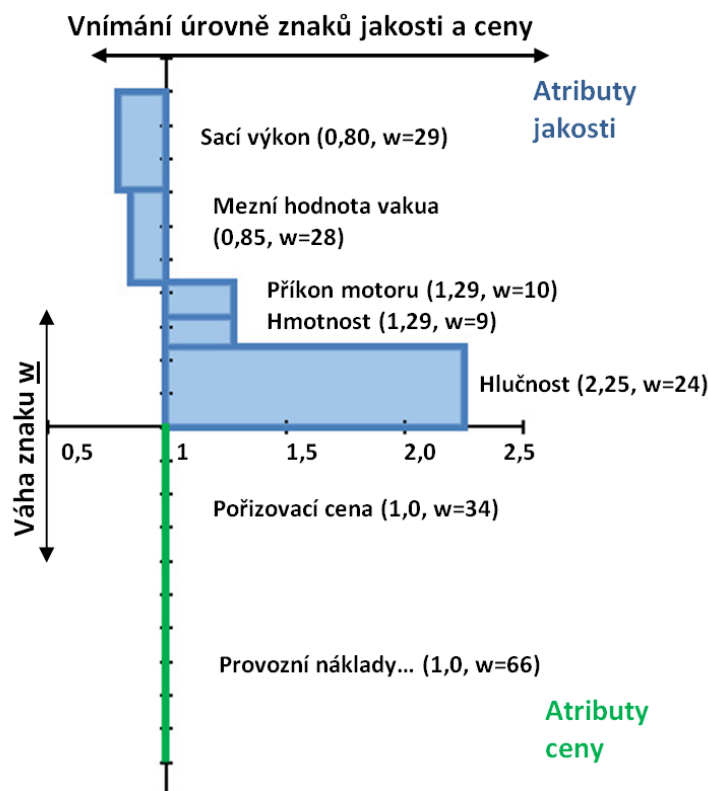
Konkurence XDS 10

Z této kategorie vychází řada XDS 10 jako vítěz, avšak je potřeba vzít v úvahu, že zde neměla největší konkurenci. Ta vyrábí vývěvy spadající do kategorie sacího výkonu 15 m³/h a kdybychom zavedli třídění dle ceny a ne dle sacího výkonu, situace by vypadala úplně jinak. Za stejné peníze bychom dostali vývěvu, která by XDS 10 předčila nejen v sacím výkonu, ale pravděpodobně i v ostatních parametrech (např. Ebara PDV 250, Oerlikon SC 15D atd.).



Obr. 22. Porovnání XDS 10 na konkurenci

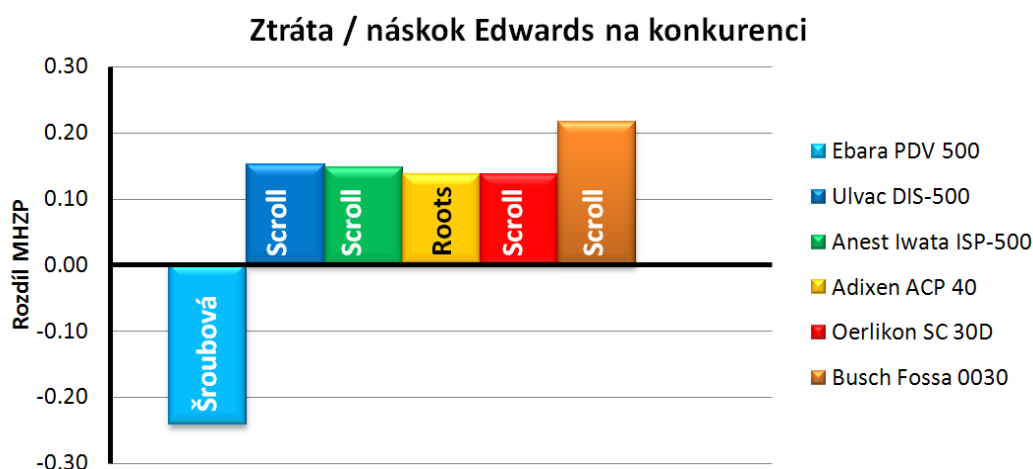
Z předcházejícího obrázku je zřejmé, že dle daného rozdělení je nejbližším konkurentem Varian Triscroll 300, který těsně porazil vývěvu Busch Fossa, především díky její velké pořizovací ceně. Z grafu hodnot na následujícím obrázku je patrné, že co se týká atributů ceny, jsou si produkty zcela rovny. Varian dosahuje o něco málo lepších funkčních parametrů, ale hodnota jeho hladiny hluku je opravdu tristní. Úroveň hluku 65 dB(A) je již mimo normu hluku pro laboratorní práce, a při dlouhodobém vystavování tomuto hluku může dojít i poškození zdraví člověka.



Obr. 23. Porovnávací graf hodnot pro zákazníka

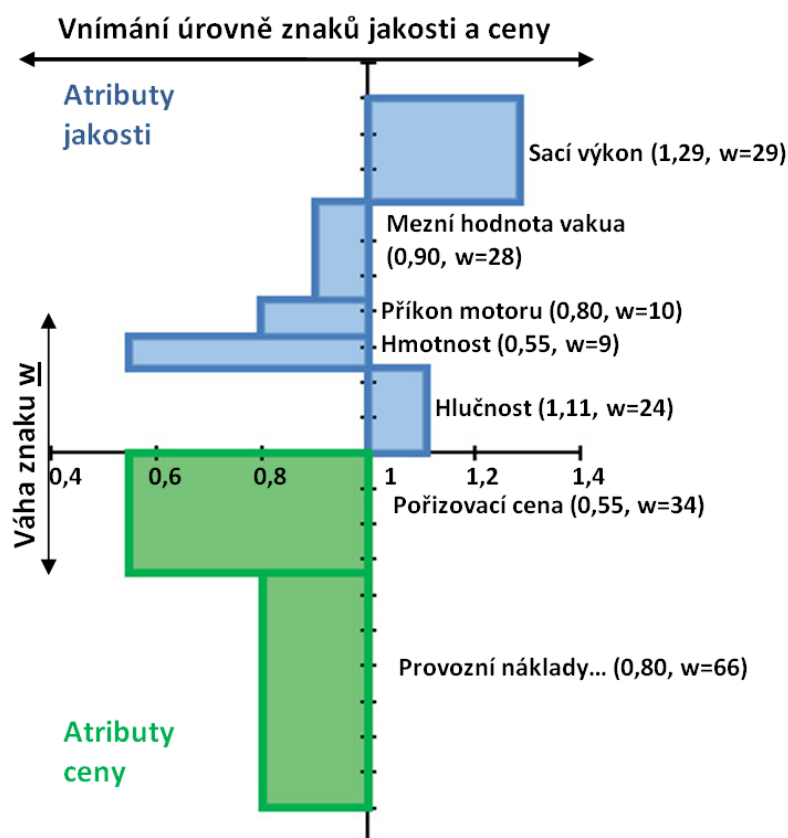
Konkurence XDS 35

V rozmezí sacího výkonu 30 až 40 m³/h je jednoznačně největším konkurentem řady XDS 35 novinka od firmy Ebara, model PDV 500. Ta drtí svou konkurenci velmi dobrými parametry a také příznivou cenou. S ostatními konkurenty si XDS 35 vede v porovnání dobře a má před nimi malý náskok. Jistým překvapením je ztracení se Adixenu mezi konkurencí, což je zapříčiněno především jeho velkou hlučností. Busch na konkurenci opět ztrácí a to především díky pořizovacím nákladům.



Obr. 24. Porovnání XDS 35 a konkurence

Jak již bylo řečeno, novinka od Ebary poráží svou konkurenci cenou, není tomu jinak ani při srovnání s XDS. V porovnávacím grafu hodnot je názorně vidět, že cena Ebary je o téměř polovinu nižší. Model XDS 35 má oproti PDV 500 sice jistou výhodu, že je konstruován na větší čerpací výkon, ale v ostatních parametrech je konkurence jednoznačně lepší, vyjma nepatrně vyšší hlučnosti.



Obr. 25. Porovnávací graf hodnot pro zákazníka

5. Vliv vibrací a hluku na zdraví člověka:

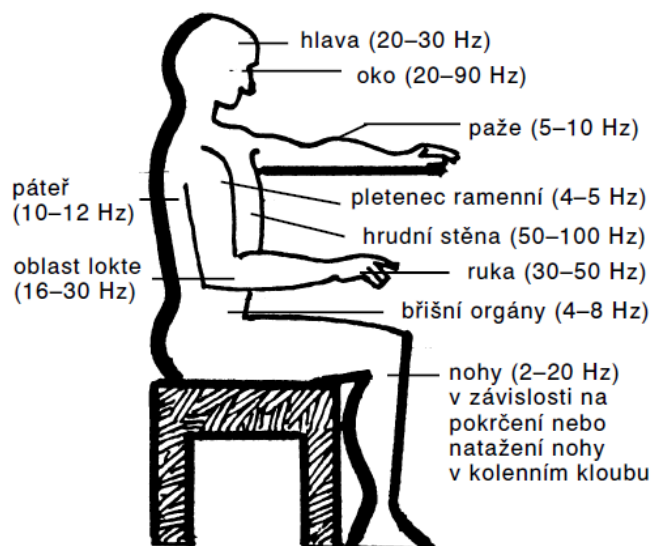
Jelikož vývěvy XDS často pracují v laboratořích, kde jsou v úzkém kontaktu s lidmi, nejsou vibrace a hluk vývěvy jen diagnostickým parametrem, ale také důležitým prvkem, který může při dlouhodobém působení ovlivnit zdraví obsluhy. Hluk a vibrace spolu úzce souvisí, vzájemně se podmiňují.

5.1. Vliv vibrací na člověka:

Obecně jsou vibrace definovány jako pohyb pružného tělesa, jehož jednotlivé body kmitají kolem rovnovážné polohy. Příčinou vibrací jsou nejčastěji střídavé síly vznikající v důsledku jevů, mezi které lze zařadit například pohyb dopravních prostředků, činnost nejrozličnějších pracovních nástrojů, rotační pohyby strojních zařízení atd.

Úroveň vibrací, jimž je člověk vystaven, je dána tělesnou konstitucí, polohou těla a končetin vzhledem ke směru vibrací, místem a velikostí plochy, přes kterou se vibrace přenášejí do lidského organismu a silami, které během expozice vibracím člověk vyvíjí.

Obecně lze říci, že každá část těla má svou rezonanční frekvenci a při určitém kmitočtu dochází tedy k zesílení účinku vibrací. Z následujícího obrázku vyplývá, že pro lidský organizmus jsou škodlivé především vibrace o nízkých frekvencích.



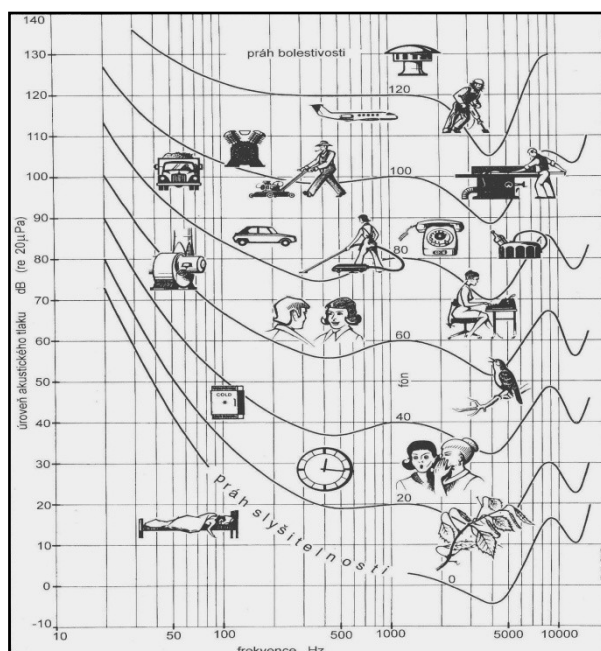
Obr. 26. Rezonanční frekvence jednotlivých částí člověka [8].

V rámci vibrací, emitovaných vývěvou, by při odpovídajícím umístění vývěvy, nemělo docházet k ohrožení zdraví člověka. Vibracemi je nejvíce ohrožena obsluha sbíječek, bagrů, křovinořezů, řidiči z povolání apod.

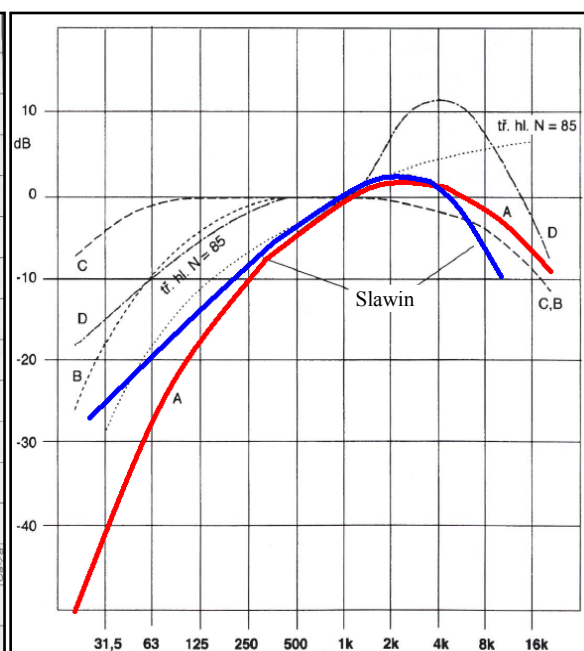
5.2. Vliv hluku na člověka:

Škodlivý hluk nemůžeme jednoznačně zcela definovat, jelikož stejný hluk působí na jednotlivé typy lidí různě. Obecně hluk chápeme jako zvuk případně zvuky, které škodí lidskému organismu a které vyvolají nepříjemný vjem či pocit, přičemž mohou mít i další škodlivé účinky, které si nemusíme ani uvědomovat. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že hodnocení hluku je značně subjektivní, ačkoliv jsou určité skupiny hluku, které působí pravděpodobně na všechny jedince stejně.

Z hlediska slyšitelnosti si můžeme rozdělit hluk na slyšitelný a neslyšitelný. Jako slyšitelný hluk chápeme nepříjemné zvuky ve slyšitelném frekvenčním pásu, a to tedy v oblasti 16 Hz až 20 kHz. Je však ještě brát v potaz, že lidské ucho není dokonalé, a tak není stejně citlivé na všechny frekvence. Např. na frekvenci odpovídající lidské řeči je omnoho citlivější než na frekvencích vysokých nebo naopak na frekvencích velmi nízkých, což je znázorněno na obr. 27.



Obr. 27. Křivky hladin stejné hlasitosti
[9]



Obr. 28. Frekvenční průběhy váhových
filtrů [9]

Z tohoto důvodu, se provádí při měření korekce, abychom přiblížili měřené veličiny citlivosti lidského ucha. Tato korekce je prováděna za pomoci váhových filtrů viz obr. 28. Rozhodující význam má dnes filtr A někdy i C. Váhový filtr A byl sestaven především podle vlivu hluku na sluchové ústrojí. Z dlouhodobého lékařského výzkumu byla navržena korekční křivka, dle Slawina, která zohledňuje vliv hluku na lidský organismus jako celek, tudíž ne jen na sluchové ústrojí, ale i např. krevní tlak, pulz, psychické změny, deprese apod. Z porovnání s křivkou váhového filtru A pak vyplývá, že pod kmitočtem 160 Hz je zdravotní škodlivost menší než připouští váhový filtr A, naopak v oblasti nad 6400 Hz je škodlivost vyšší (měřené hodnoty jsou podhodnocené) [9].

Zkoumání účinku neslyšitelného hluku na lidský organismus je poměrně mladým, ale stále se rozvíjejícím oborem. Pro lidský organismus jsou obzvláště nebezpečné infrazvukové frekvence, které se shodují s biologickými rytmy. Při malých intenzitách člověk pociťuje nepříjemné vibrace, nevolnost a závratě. Při vysoké intenzitě může člověku způsobit perforaci kochleární membrány nebo dokonce i infarkt. Ohrožení zdraví však vzniká až teprve při trvalé hladině akustického tlaku nad 130 dB. Zvuky s frekvencí několika málo kmitů za vteřinu rozechvívají vnitřní orgány a ovlivňují ústrojí středního ucha. To může u některých lidí způsobovat euforii, která však brzy přejde do pocitů tísně, strachu, nebo dokonce do nauzey, jejíž příznaky jsou totožné s mořskou nemocí. Problematika infrazvukového hluku je poslední dobou nejvíce spojována s větrnými elektrárnami.

Dlouhodobé vystavování hlučnému prostředí může mít nejčastěji tyto zdravotní následky [10] :

- **Ztížená verbální komunikace**

Dlouhodobý pobyt v hlučném prostředí značně stěžuje komunikaci a tím vede ke zhoršeným pocitům, stísněnosti nebo podrážděnosti. To má za následek zhoršování vztahů, pokles výkonnosti a ztrátu koncentrace. Hlučné prostředí rovněž zvyšuje nebezpečí mísení a překrývání různých zvuků, což může vést k přeslechu telefonů, alarmů nebo jiných důležitých zvuků a pokynů.

- **Poškození sluchu**

Zhoršování sluchu je nevratný proces. Dochází k němu při expozici příliš vysokým hlukem nebo při dlouhodobém vystavení zvýšeným hladinám hluku. Riziko ztráty sluchu se

netýká jen pracovního prostředí, ale je nutno si dávat pozor i při mimopracovních činnostech, jako je poslech příliš hlasité hudby nebo sečení trávy bez ochrany sluchu.

- **Rušení spánku**

V tomto případě se nemusí jednat pouze o bezprostřední přerušování samotného spánku nebo ztížení možnosti usnout. Nebezpečné je rovněž ovlivňování hloubky a kvality spánku, zvláště jeho nejhlubší fáze. Nedostatek spánku se pak projevuje jednak zvýšenou únavou, bolestmi hlavy, horší náladou, ale rovněž se mohou objevit dýchací obtíže, zvýšený tlak, změny srdečního pulsu, srdeční arytmie apod. Skutečností je fakt, že u lidí nedochází k adaptaci na hluk, způsobující rušení spánku, ani po více letech.

- **Ovlivnění kardiovaskulárního systému**

Mnohými laboratorními pokusy a výzkumy byl zjištěn vliv nejen na krátkodobé a přechodné zvýšení tlaku a tepu, ale může mít za následek i trvalé účinky, jako je ischemická choroba srdeční nebo hypertenze.

- **Ovlivnění pracovní výkonnosti**

Tato skutečnost zatím nebyla sledována v praxi, ale pouze sledováním u dobrovolníků. Může se projevovat zvláště tam, kde je nutná značná soustředěnost, trvalá pozornost a kde jsou zvýšené nároky na paměť apod.

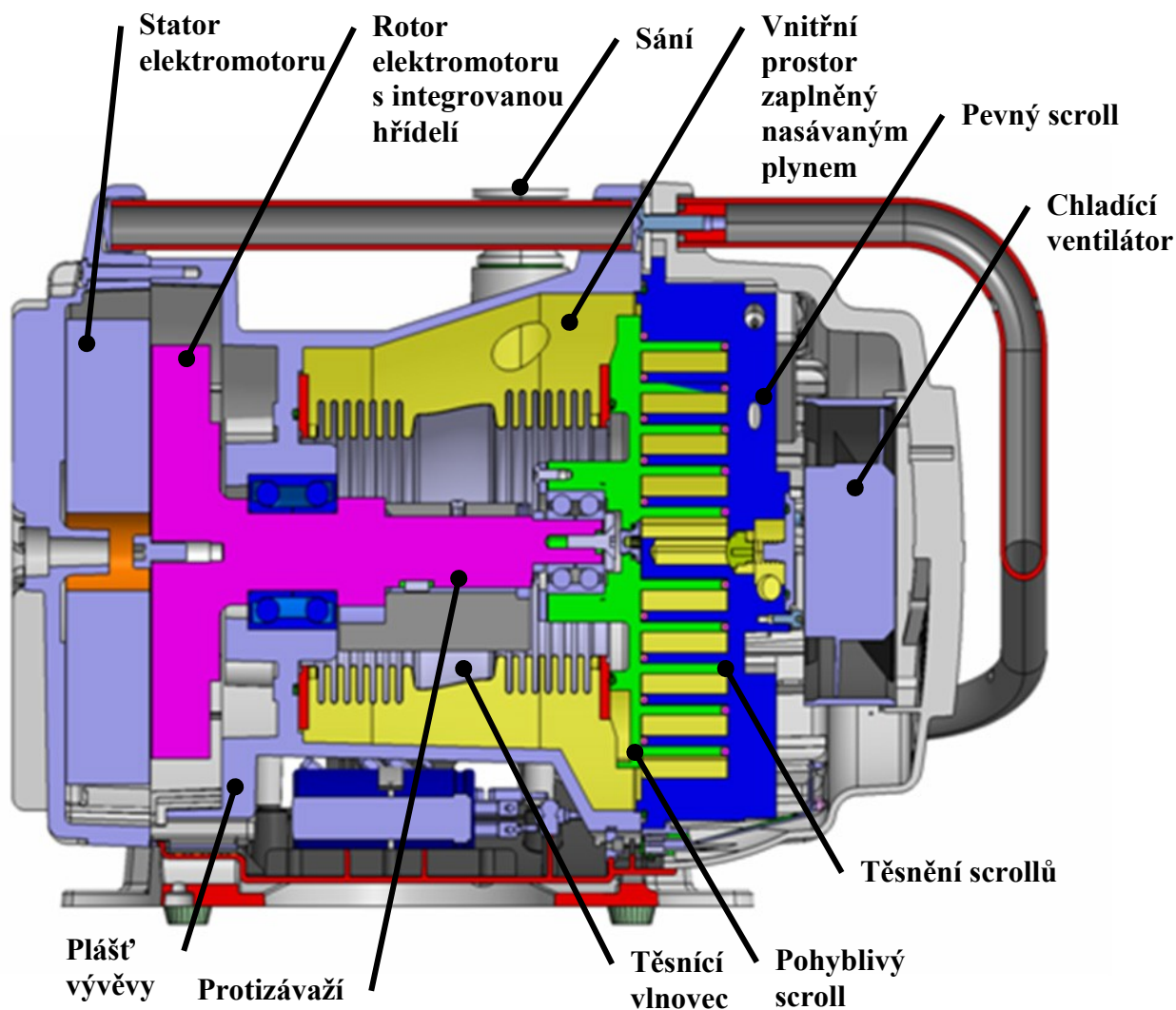
- **Vliv na duševní zdraví**

Zde zatím nebyly žádné účinky prokázány. Obecně se nepředpokládá, že by mohl hluk vyvolávat duševní nemoci, ale může být i příčinou zhoršení jejich symptomů.

Hlučnost vývěvy XDS 10 dle katalogových údajů je menší než 55 dB(A), což jsou vyhovující hodnoty pro pracoviště, kde je konána duševní práce rutinního charakteru. Pro pracoviště, kde je konána duševní práce s požadavkem na trvalou soustředěnost, je již hygienický limit stanoven na 50 dB(A).

Pokud bychom vzali v potaz dělení hluku dle Lehmana, nacházela by se vývěva v II. pásmu tzv. pásmu relativního hluku (30-65 dB(A)), kde je škodlivost hluku dána individuálně dle subjektu. K poškození zdraví může dojít a to obzvláště při dlouhodobém působení.

6. Konstrukce a popis měřené vývěvy XDS 10:



Obr. 29. Řez vývěvou XDS 10 [6].

Jako pohonná jednotka vývěvy slouží na zakázku vyrobený asynchronní elektromotor s axiální vzduchovou mezerou Brook Crompton. Tento motor je společností dodáván již zastavěn do hliníkového pláště vývěvy. Společnost Brook Crompton je tedy zodpovědná za správné ustavení motoru v plášti i za přesnost a vyvážení hlavní hřídele, jež tvoří s rotorem motoru jeden celek.

Na hlavní hřídel jsou nalisována dvě ložiska, z nichž jedno slouží jako uložení do pláště vývěvy, a druhé je nalisováno na excentrickém osazení hřídele. Zde zabraňuje pohyblivému scrollu v rotačním pohybu. Tudiž scroll může konat jen pohyb orbitální.

Oba scrolly do sebe zapadají s přesností v řádech tisícín milimetru. A to především proto, aby nedocházelo ke vzájemnému tření stěn obou scrollů, a také aby čela scrollů byla rovnoběžná a nedocházelo k nerovnoměrnému opotřebení těsnění scrollů a případnému úniku tlaku. Správné ustavení scrollů je základním předpokladem pro správnou činnost vývěvy.

Jelikož při činnosti vývěvy je celý vnitřní prostor zaplněn čerpaným plynem, tak jsou ložiska chráněna vlnovcem. Vlnovec je na jedné straně připojen přes těsnění k plášti vývěvy a na straně druhé k pohyblivému scrollu. Úkolem vlnovce je zabránit kontaminaci vakua mazivem z ložisek, zabránit přisávání vzduchu přes ložisko od elektromotoru a také zabránit rotačnímu pohybu scrollu.

Jelikož se scrolly při čerpání plynu poměrně hodně zahřívají, je nutné jejich chlazení. To je zajištěno ventilátorem, který je umístěn pod plastovým krytem u ústí vývěvy.

7. Očekávané závady vývěvy a jejich možný projev ve vibračním spektru:

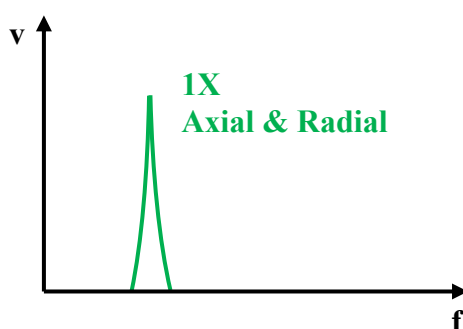
Možné závady vývěvy:

- **Závady způsobující špatné funkční parametry vývěvy:**
 - Tyto závady jsou způsobeny špatnou těsností vývěvy, kterou může zapříčinit například špatné ustavení scrollů, jejich utěsnění, špatné utěsnění vlnovce, případně výrobní vada pláště vývěvy.
- **Závady způsobující hluk a vibrace:**
 - Nevyváženost – Rotoru elektromotoru resp. hřídele s protizávažím
 - Špatné ustavení – Scrollů
 - Ložiska – Špatné ustavení
 - Poškození jednotlivých elementů
 - Závady elektromotoru – elektricky buzené vibrace

7.1. Nevyváženost:

Obecně se je nevyváženost asi nejčastějším zdrojem vibrací, najdeme ji prakticky u všech rotačních strojů. Standardním projevem nevyváženosti rotoru ve frekvenčním spektru je špička na první otáčkové frekvenci, měřeno v radiálním směru. V časovém spektru má nevyváženost sinusový průběh.

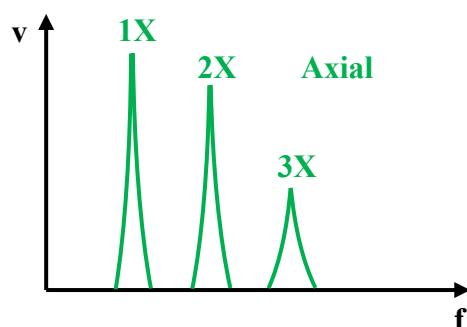
Dle konstrukce vývěvy lze očekávat, že se špička objeví i v axiálním směru, jelikož rotor elektromotoru je uložen letmo.



Obr. 30. Projev nevyváženosti ve spektru vibrací

7.2. Špatné ustavení scrollu:

Tato závada by se teoreticky mohla projevit jako úhlová nesouosost. Ta se projevuje velkými vibracemi v axiálním směru a to na první otáčkové frekvenci s druhým a možným třetím násobkem. Avšak je pravděpodobné, že by se tato závada dříve projevila špatnými funkčními parametry vývěvy, nežli by byla odhalena ve frekvenčním spektru.



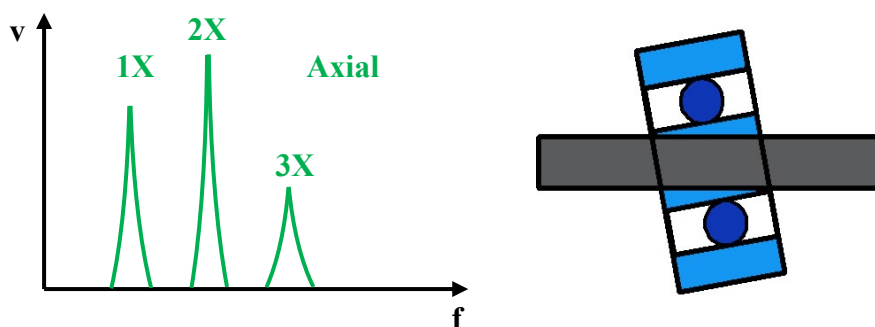
Obr. 31. Projev nesouososti ve spektru vibrací

7.3. Závady ložisek:

Při provozní diagnostice ložisek se většinou soustředíme na včasné odhalení počínající závady ložiska vlivem opotřebení, a tudíž je měření prováděno na vyšších frekvencích (např. metodou Spike Energy). Jelikož diagnostikujeme nový výrobek, zaměřil bych se spíše na závady, které mohou vzniknout při montáži ložisek.

Nesouosé ložisko

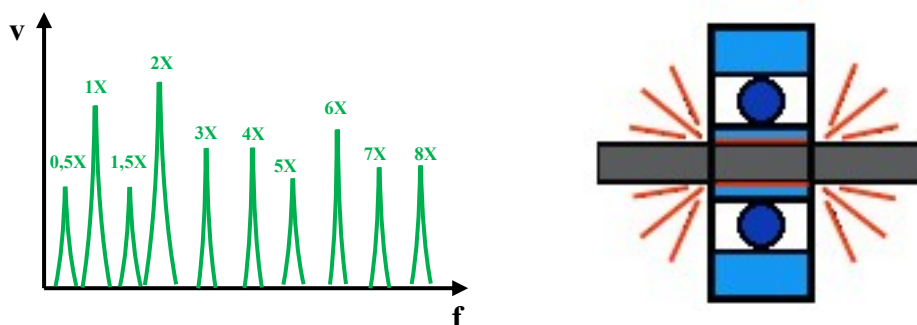
Takové ložisko bude generovat velké axiální vibrace. Způsobí kroutivý pohyb, u kterého je fázový rozdíl nahoře a dole (případně po stranách) přibližně 180° , měřeno v axiálním směru na stejném ložiskovém domku [11]. Vyvažování nebo pokusy o ustavení spojek apod. vibrace nesníží, obvykle je nutné ložisko demontovat a nalisovat znovu.



Obr. 32. Nesouosé ložisko a jeho možný projev ve frekvenčním spektru

Prokluzování ložiska v uložení případně na hřídeli

Je způsobeno nesprávným lícováním mezi součástkami, tudíž dochází k mechanickému uvolnění. Tyto závady se projevují v radiálním směru a to řadou násobků otáčkové frekvence (až 20X), může také způsobit subharmonické násobky na 1/2 nebo 1/3 otáček, vibrace mohou být silně směrové a fáze značně nestálá. Toto mechanické uvolnění se vyznačuje i zvýšenou hladinou šumu ve spektru.



Obr. 33. Mechanické uvolnění ložiska a jeho možný projev ve frekvenčním spektru

Poškození jednotlivých elementů ložiska

K poškození částí ložiska dochází většinou až během provozu, lze však předpokládat, že k poškození může dojít i díky výrobní vadě nebo během nesprávné montáže apod.

Každé ložisko má svou vlastní poruchovou frekvenci pro jednotlivé elementy. To je dáno různými rozměry ložisek, tvary a velikostí valivých elementů, jejich počtem a úhlem styku.

Poruchové frekvence valivých ložisek

Poškození vnitřního kroužku:

$$\text{BPFI} = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \text{otáčky}$$

Poškození vnějšího kroužku

$$\text{BPFO} = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \text{otáčky} = n \cdot \text{FTF}$$

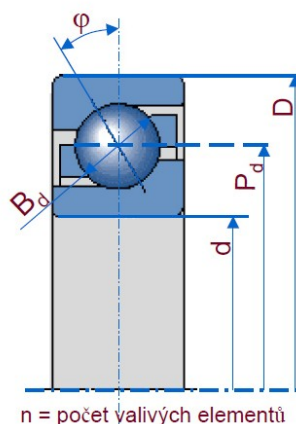
Poškození valivých elementů:

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2B_d} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right)^2 \right] \cdot \text{otáčky}$$

Poškození klece:

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \varphi \right) \cdot \text{otáčky}$$

Pro stojící vnější kroužek. V případě rotujícího vnějšího kroužku se zamění znaménko (\pm) s výjimkou vzorce pro valivá tělíska.



Obr. 34. Poruchové frekvence valivých ložisek [12]

Na předcházejícím obrázku jsou uvedeny vzorce pro výpočet poruchových frekvencí. U mnoha ložisek nemusíme těchto vzorců užít, neboť je lze dohledat v katalogu výrobce ložisek nebo v softwarové databázi diagnostických firem.

Na vývěvě XDS 10 se vyskytují dvě kuličková dvouřadá ložiska s kosoúhlým stykem a děleným vnitřním kroužkem. Ani jedno není standartní, proto je nutné provést výpočet dle odměřených rozměrů a uvedených vzorců. Při výpočtu uvažuji úhel φ roven 40° pro obě ložiska, dle nejběžnější konstrukce daného typu ložisek.

Označení ložiska	INA LD 17/40-2RS	SKF BA2B 633313 DC
Střední průměr P_d [mm]	28,5	45
Průměr val. elementu B_d [mm]	8	9,5
počet val. elementů n	10	14
kontaktní úhel φ [°]	40	40
otáčky [s^{-1}]	25	25
BPFI [Hz]	151,9	203,3
BPFO [Hz]	98,1	146,7
BSF [Hz]	42,5	57,7
FTF [Hz]	9,8	10,5

Tab 2. Tabulka rozměrů a poruchových frekvencí ložisek v XDS 10

7.4. Elektricky buzené vibrace:

Všechny elektrické stroje jsou mimo vibracemi mechanického původu také zatěžovány vibracemi způsobené elektrickými vlivy. Vzhledem k ojedinělé konstrukci elektromotoru, si nejsem zcela jist přesnými projevy závad ve frekvenčních spektrech. Pokud budu vycházet z předpokladu, že se vibrace projeví stejně jako u elektromotoru s klasickou konstrukcí, mohli bychom se ve frekvenčních spektrech setkat nejspíše s těmito hlavními projevy závad:

Statická změna vzduchové mezery, zkratované statorové plechy

Pokud nebude vzduchová mezera mezi statorem a rotorem rovnoměrná, pak dochází k tomu, že síly působící na rotor nejsou vyvážené, což má za následek silné směrové vibrace při dvojnásobku síťové frekvence (100 Hz). Rozdíly ve vzduchové mezeře nemají u indukčních motorů překročit 5% [11]. Magnetická přitažlivost je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti mezi rotorem a statorem, proto i malá výchylka způsobuje relativně velké vibrace.

Zkratované statorové plechy (např. jako důsledek poškození při montáži či provozu) způsobují lokální zahřívání, což může deformovat stator. Tím se vyvolají teplotně indukované vibrace, které se mohou významně zvětšovat s dobou provozu. Tato závada se také projeví na dvojnásobku síťové frekvence, jelikož důsledek této vady je opět problém se statickou mezerou.

Excentrický rotor:

U elektromotorů klasické konstrukce se tato závada projevuje na dvojnásobku síťové frekvence obklopena postranními pásmy s frekvencí průchodu pólů F_p a také postranními pásmy okolo otáčkové frekvence [11]. Samotná frekvence průchodu pólů F_p je nízká obvykle 0,3-2 Hz (F_p je dána skluzovou frekvencí vynásobenou počtem pólů). Avšak excentricita rotoru způsobuje u klasické konstrukce motoru proměnnou (rotující) vzduchovou mezeru, což u diskového motoru nevznikne, proto odhaduji, že excentrický rotor se u diskového motoru možná projeví jinak.

Poškození rotoru:

Zlomené či prasklé rotorové tyče, špatné spoje mezi rotorovými tyčemi a koncovými prstenci nebo zkratované rotorové plechy. Toto vše může způsobovat vysoké vibrace na otáčkové frekvenci rotoru s postranními pásmy F_p . Navíc se tento jev opakuje někdy až do pátého násobku otáčkové frekvence.

Uvolněné nebo nespojené rotorové tyče jsou indikovány postranními pásmy okolo dvojnásobku síťové frekvence, kolem frekvence průchodu rotorových tyčí ($RBPF = \text{počet tyčí} \times \text{otáčky}$), anebo na jejích harmonických násobcích. Často to způsobí vysoké úrovně na $2 \times RBPF$ a pouze malou amplitudu na $1 \times RBPF$ [11].

8. Analýza současného systému měření vibrací na výrobní lince:

Měření vibrací vývěv XDS se provádí na samém konci výrobního procesu těsně před balením, kdy je vývěva již otestována na funkčnost (performance test). Samotný test je téměř automatický, obsluha jen vývěvu připojí, zapne test a přepíná frekvenci napájení mezi 50 a 60 Hz. Test je ihned počítačem vyhodnocen a obsluze se jen zobrazí, zda je vývěva vyhovující či nikoliv.

Jelikož se testovací zařízení dovezlo při stěhování výrobní linky z Anglie do ČR jako její součást, nikdo nemá prakticky tušení, jak je měření nastaveno a proč.

8.1. Používané zařízení k měření vibrací:

K měření vibrací jsou použity dva akcelerometry PCB Piezotronics, které měří vibrace ve vertikálním a axiálním směru pomocí speciální ucpávky a o zpracování signálu se stará měřicí karta National Instruments a stolní počítač se softwarovou aplikací vytvořenou v programu LabVIEW.

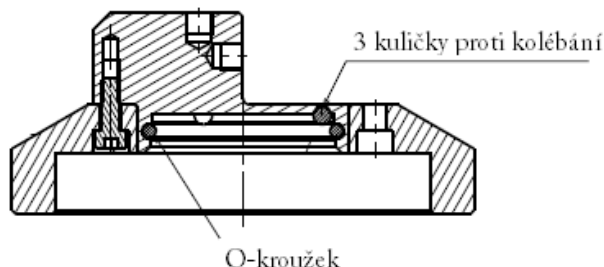
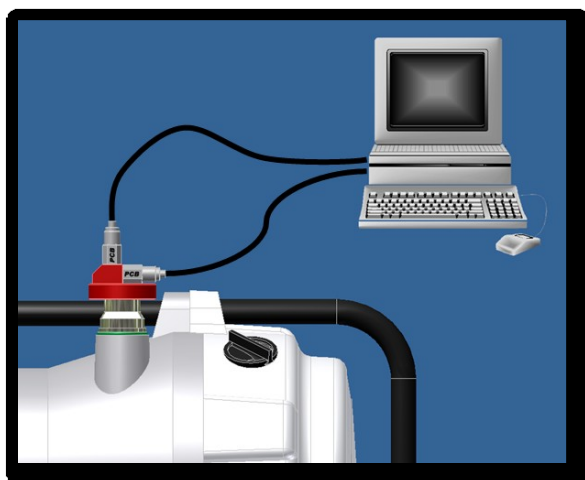
Základní specifikace akcelometrů PCB Piezotronics 623C01:

Citlivost ($\pm 5\%$)	100 mV/g
Měřicí rozsah	± 50 g
Frekvenční rozsah (± 3 dB)	1 - 15000 Hz
Napájení	18 – 28 V (DC)
Nelinearita	$\pm 1\%$
Maximální hodnota zrychlení bez poškození	5000 g
Teplotní rozsah	-54 až 121°C
Hmotnost	51 g
Snímací prvek	keramika
Konstrukce	smykový
Konektor	2-Pin MIL-C-5015

Tab 3. Základní údaje o akcelometru PCB 623C01

Ucpávka pro umístění akcelometrů:

Jelikož je celý povrch vývěvy vytvořen z hliníku a na šroubové připojení akcelometru při konstrukci vývěvy také nebylo pamatováno, stalo se umístění snímače poměrně složitým problémem. Z tohoto důvodu jsou snímače umístěny na speciální ucpávce sání dle následujícího obrázku.



Obr. 35. Příruba pro umístění akcelerometrů [6]

Ucpávka je umístěna na sání a po zapnutí vývěvy je přisána. Styk příruby sání a ucpávky zajišťují 3 kuličky, které zabráňují možnému kolébání apod. Dostatečné přisání zajišťuje o-kroužek, který těsní přírubu po obvodu.

Základní charakteristika měřící karty National Instruments PCI-4474:

Tato měřící karta je určena pro vestavění do běžného stolního počítače a lze ji využívat jak pro vibrační tak akustická měření. Jedná se o 4 kanálovou kartu s nominálním rozlišením 24 bitů, s A/D převodníkem typu delta-sigma. Maximální rychlost vzorkování uvádí výrobce 102,4 kS/s. Nechybí ani antialiasingový filtr. (Kompletní specifikace je dostupná na www.ni.com).

Software a nastavení měření:

Jak již bylo řečeno, obsluha pracuje s aplikací vytvořenou v software LabVIEW, Tento software umožňuje vytvořit poměrně složité aplikace dle individuálních požadavků a také dle schopností obsluhy. Pokusím se stručně popsat používanou aplikaci používanou k měření vibrací vývěv XDS.

- Aplikace může pracovat ve dvou režimech a to operátor (nastavení pro výrobu, nelze měnit) a režimu engineer (umožňuje individuální nastavení).
- Režim operátor pro XDS 5/10:
 - Celý proces je automatický, obsluha nemůže nic měnit, klikne jen na tlačítko start.
 - Proveďte měření vibrací ve vertikálním a axiálním směru společně s obálkovou analýzou a to pro napájení 50 i 60 Hz.

- Měřeno je zrychlení v jednotkách [mg], ve frekvenčním rozsahu 0-1000 Hz.
- V režimu je nastavená maska (alarmové hodnoty) při jejímž překročení se obsluze zobrazí pouze špatná (fail) a v kterém směru, nikoliv frekvence, na které vývěva neprošla.
- Výsledky jsou uloženy do textového souboru, jako tabulka hodnot.
- Režim engineer:
 - Tento režim umožňuje zcela individuální nastavení měření na všech 4 kanálech.
 - Nastavit lze:
 - Měřenou veličinu a jednotky
 - Maximální amplitudový rozsah
 - Frekvenční rozmezí
 - Počet FFT čar
 - Typ okna
 - Pásmový filtr
 - Průměrování
 - Vážení

8.2. Zhodnocení procesu měření vibrací na výrobní lince:

- Na základě zjištěných parametrů, bych hodnotil hardwarové vybavení jako dobré, rozhodně dostačující pro prováděná měření.
- Upevnění snímačů přes ucpávku sání se mi zdá přes všechnu snahu její konstruktérů trochu nešťastné. Při pohledu na obr. 29 zjistíte, že sání, na kterém jsou snímány vibrace, je poměrně vzdáleno od uložení hlavního ložiska, nemluvě o tom, že se vibrace musí šířit poměrně slabou stěnou a ještě přecházet do ucpávky přes kuličky. Všechny tyto faktory výrazně ovlivňují přesnost měření. Avšak jsem si vědom toho, že tento způsob umístění snímačů má velkou výhodu ve své rychlosti montáže a z hlediska možné kontaminace pracovního prostoru vývěvy je také bezpečný.

Jistou alternativou by mohlo být našroubování ucpávky místo sací příruby, což by mělo za následek pevné šroubové připojení snímačů, avšak na stále stejném místě, za cenu komplikovanější montáže ucpávky a navíc s možným rizikem kontaminace vývěvy otřepy ze závitů apod.

Druhou a asi jedinou vhodnou možností, aniž bychom museli lepit měřící body, či kupovat nové akcelerometry, je konstrukční úprava pláště vývěvy, na kterém by bylo

potřeba vytvořit rovný náletek se závitovou dírou pro připojení akcelerometrů, nejlépe přímo nad uložením ložisek.

- Nedostatky v programu pro měření vibrací:
 - Jak již bylo zmíněno, program okamžitě neukazuje frekvence, na kterých vývěva generuje nadměrné vibrace – musí se dohledávat v textovém souboru.
 - Na obrazovce se ukazuje jen frekvenční spektrum ve velmi malém rozlišení, tudíž pro diagnostiku prakticky nepoužitelné.
 - Nelze uložit spektrum, jen textový soubor a z něj poměrně složitě udělat např. v MS Excel spektrum.
 - Nezobrazuje časový průběh signálu.
 - Jelikož je program jen spustitelná aplikace, nelze se dostat do detailního nastavení a nelze jej upravovat.

Další velkou chybu vidím v tom, že chybí podklady, na jakých základech byly stanoveny masky (alarmové hodnoty) pro jednotlivé frekvence a navíc nevím, jestli by nebylo vhodnější užít v daném frekvenčním rozsahu měření rychlosti než zrychlení. Spektra rychlosti jsou přeci jen přehlednější a vyhovující pro měření v daném frekvenčním rozsahu (1 – 1000Hz).

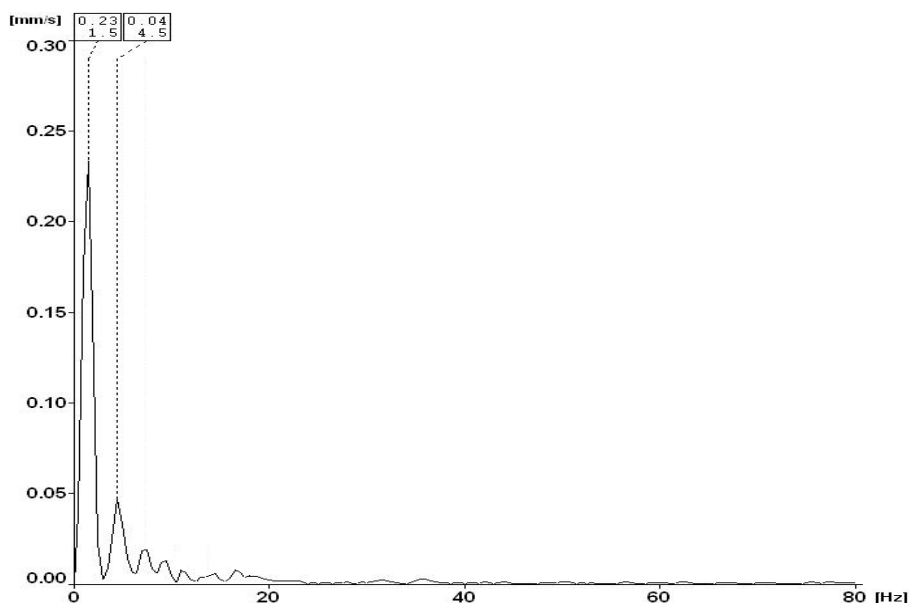
9. Možný vliv vybraných vnějších činitelů na měření vibrací na výrobní hale:

9.1. Měření vibračního pozadí na výrobní hale:

Jelikož montážní linka XDS vývěv se nachází ve stejné hale, jako velké obráběcí stroje hrozí zde značné riziko přenášení vibrací podlahou haly, což může někdy velmi negativně ovlivnit výsledky vibrační analýzy. Z tohoto důvodu lze obecně říci, že je vhodné před každým provozním měřením zjistit zda k tomuto jevu nedochází.

V místě provádění vibrační analýzy byl pro upevnění snímače vybrán jako nejvhodnější místo kotevní šroub manipulačního jeřábu. U něj je předpoklad dobrého upevnění do podlahy haly a tudíž dobrá přenosová vazba.

Zjištěná efektivní hodnota rychlosti vibrací v pásmu 1-1000 Hz byla velmi malá, přibližně 0,03 mm/s. Což je zanedbatelná hodnota, kterou umocňuje fakt, že veškeré „větší“ hodnoty vibrací se vyskytují do frekvence 10 Hz, viz následující spektrum.



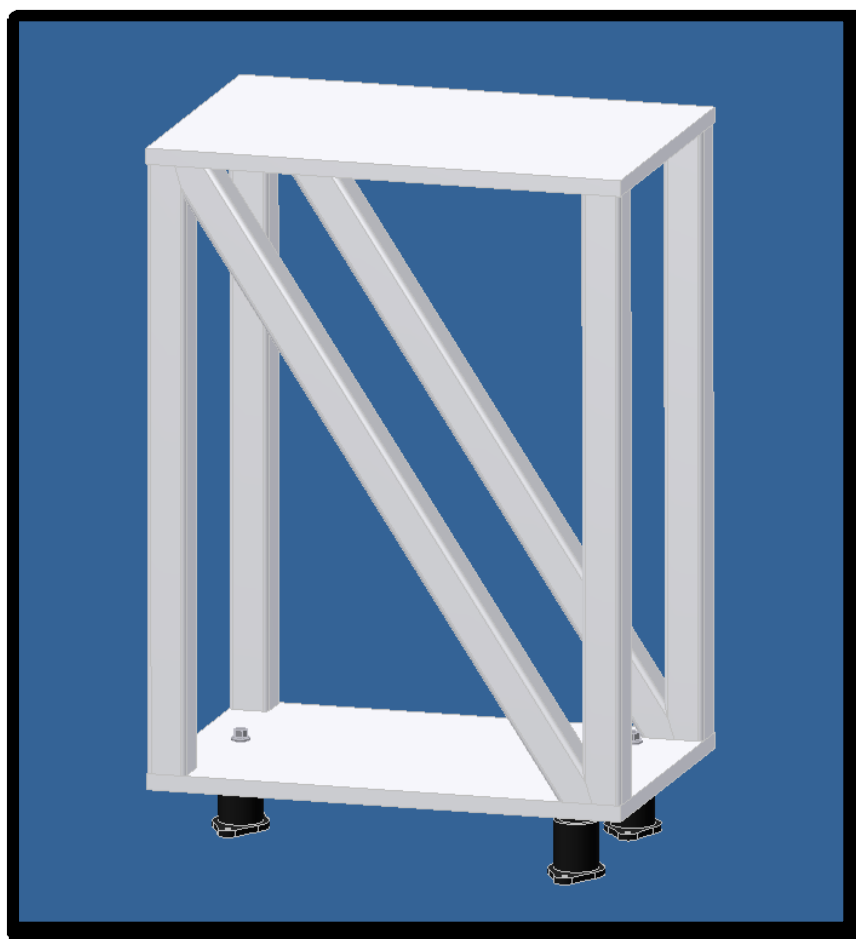
Obr. 36. Spektrum vibračního pozadí na výrobní hale

Pozn.:

Měření bylo realizováno před dokončení výstavby nové výrobní haly. Po jejím dokončení a uvedení do provozu by bylo vhodné měření opakovat.

9.2. Analýza stolu pro měření vibrací:

Výsledky měření vibrací může poměrně významně ovlivnit i podklad, na kterém bude měřený objekt umístěn. Měřený objekt by měl být umístěn na pevném tvrdém podkladě. Vyvarovat bychom se měli měření na „tlumičích“ vibrací jako jsou gumy, hadry apod. Nejlepší možnou všude dostupnou volbou je betonová podlaha. Zde nehrozí zkreslení výsledků rezonancí, např. částí stolu, avšak musíme si dát pozor na přenos vibrací podlahou z okolí (viz kap. 9.1). Navíc u měření malých strojů, kam vývěvy XDS bezpochyby patří, by bylo pro obsluhu takové měření velmi nepohodlné a samotná práce by byla neefektivní. Z tohoto důvodu je měření vibrací vývěv XDS prováděno na stole, který je k tomu výhradně určen (viz obr. 37) a je zakomponován do výrobní linky.



Obr. 37. Stůl užívaný pro měření vibrací

Stůl je svařen z dutých ocelových profilů 50x50 mm dle obrázku, podstava a pracovní plocha je vytvořena z ocelového plechu tloušťky 20 mm. Velikost konstrukce je 800x600x400 mm (výška x šířka x hloubka). Ke konstrukci jsou přimontované přes silentbloky tři nožky, za

které je celý stůl uchycen pevně k podlaze. Silentbloky mají zabránit možnému šíření vibrací z podlahy do stolu.

Jak již bylo naznačeno, pokud budeme provádět měření vibrací na tomto stole, či jiné konstrukci, musíme si uvědomit, že může dojít ke zkreslení výsledků na rezonančních frekvencích dané konstrukce. K tomuto zkreslení dojde tehdy, pokud se shoduje významná frekvence vibrací měřeného stroje (např. otáčková) s rezonanční frekvencí konstrukce stolu. Stůl bude na této frekvenci vybuděn k rezonanci a naměřená hodnota vibrací na dané frekvenci bude mnohonásobně vyšší. K určení rezonančních frekvencí konstrukcí se užívají dva základní přístupy, a to analytické (softwarové) a experimentální.

9.2.1. Analytická modální analýza stolu v programu Autodesk Inventor:

Modální analýza je v moderním software počítána na základě metody konečných prvků. Vypočtené výsledky je však potřeba brát s jistou tolerancí, protože ne vždy se nám podaří přesně zadat okrajové podmínky a navíc teoretické předpoklady a praxe se často liší.

Velkou výhodou tohoto postupu je jeho rychlost, názornost výsledků a jednoduchost. Rychlost výpočtu je ovšem hodně závislá na složitosti konstrukce a výkonu počítače. Složitější konstrukce mohou při daných požadavcích na přesnost trvat i několik hodin. Další velkou výhodou je, že pro výpočet již nepotřebujete nutně speciální software (Ansys apod.). Modální analýzu již zvládá na poměrně slušné úrovni např. i Autodesk Inventor, jehož prvotním úkolem je přeci jen modelování součástí a tvorba výkresů.

Stručný popis postupu modální analýzy v Autodesk Inventor:

- Tvorba modelu analyzované konstrukce
- Nastavení modální analýzy – nastavuje se počet režimů, rozsah frekvencí atd.
- Nastavení počátečních podmínek:
 - Materiál – nastavena ocel
 - Vazby – nastavena pevná vazba v uchycení na třech šroubech v podstavě
 - Zatížení – nastavena pouze gravitace
 - Síť – standardní nastavení je nedostačující, je potřeba ji lokálně zjemnit a zhustit pro správnost výpočtu
- Spuštění simulace

Vypočtené frekvenční hodnoty:

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
32,68 Hz	85,12 Hz	112,58 Hz	205,42 Hz	294,65 Hz	323,19 Hz	327,43 Hz	333,1 Hz

Tab 4. Výsledky modální analýzy v programu Autodesk Inventor

Pozn.:

Kompletní protokol modální analýzy z programu Autodesk Inventor s podrobnými počátečními podmínkami a kompletními výsledky, včetně všech obrázků tvarů kmitů, je umístěn pro svou rozsáhlost na CD, které je součástí diplomové práce.

9.2.2. Experimentální určení rezonančních frekvencí – Bump test:

Nejznámější metodou pro určení rezonančních frekvencí je tzv. experimentální modální analýza. Pro tuto analýzu jsou nutné dva měřicí kanály. Na první kanál je napojen signál ze snímače síly, který je umístěn na kladívku pro buzení vibrací a na kanál druhý je umístěn snímač pro měření vybuzečné odezvy v konstrukci.

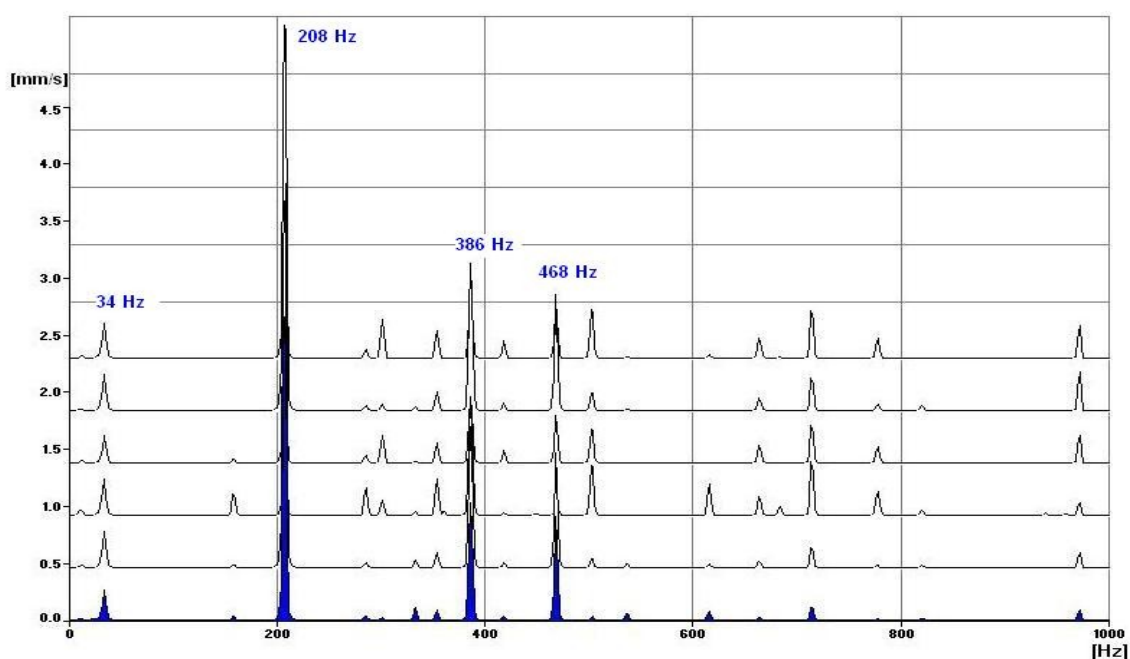
Pro analýzu stolu bylo však využito jiné metody, takzvaného bump testu. Metoda zkoušení je obdobná s modální analýzou, ale je podstatně zjednodušená. Tato metoda je pouze jednobanální a snímáme pouze odezvu, nikoliv budící sílu. V praxi to znamená, že k vybuzení konstrukce použijeme pouze kladívko či gumovou paličku bez jakéhokoliv snímače síly. Důsledek tohoto zjednodušení je ten, že stejně jako u experimentální modální analýzy jsme schopni určit rezonanční frekvence, ale nejsme už schopni určit vlastní tvary kmitů.



Obr. 38. Schematický postup bump testu

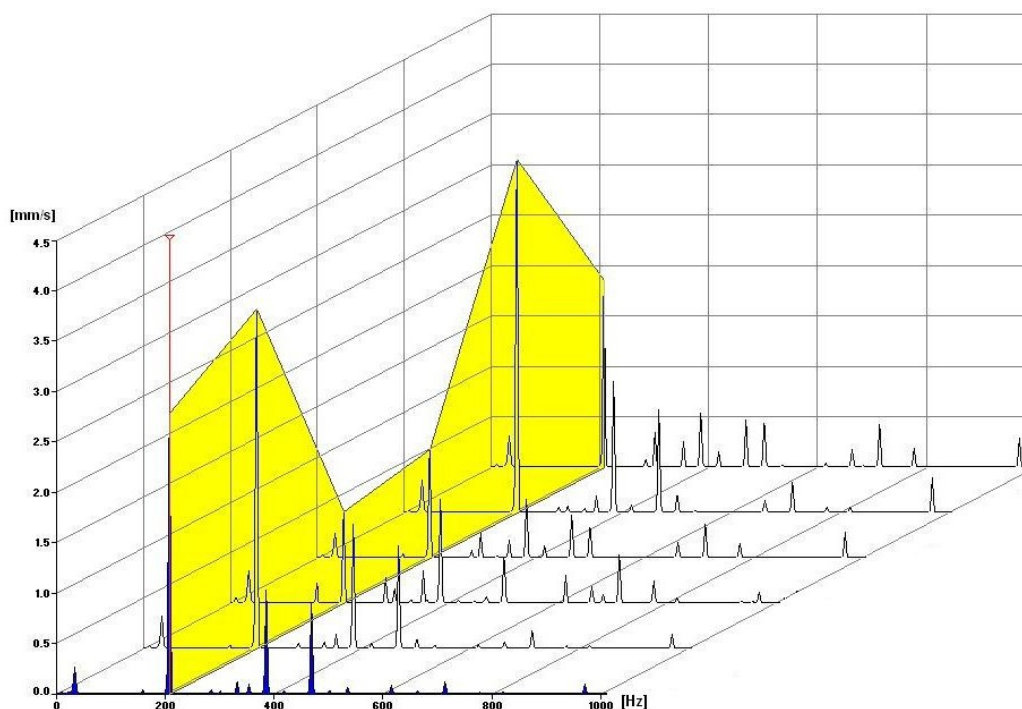
Postup a zpracování výsledků:

Jelikož měření bylo prováděno pouze jako orientační, rozhodl jsem se, že ho provedu pouze na pracovní ploše stolu, kde je největší pravděpodobnost vybuzení konstrukce. Pokud bych chtěl provést přesnou analýzu stolu, měření by bylo prováděno po celé konstrukci v předem stanovených bodech. V mém případě bylo čidlo umístěno doprostřed stolu a v nahodilých místech byla buzena pracovní plocha. Takto bylo naměřeno několik frekvenčních spekter. Tyto spektra je v rámci selekce špiček vhodné zpracovat do multispekter, abychom lépe našli shodné rezonanční frekvence.



Obr. 39. Kaskádové multispektrum odezvy stolu – čelní pohled, vertikální směr

Čelní pohled na kaskádové multispektrum (obr. 39) umožňuje poměrně rychlé a jednoduché určení opakujících se špiček, resp. rezonančních frekvencí. Toto spektrum má nevýhodu v tom, že z něj prakticky nelze vyčíst amplitudu na dané frekvenci. K tomuto účelu je vhodnější šikmý pohled na multispektrum (obr. 40), z kterého naopak získáme jasný přehled o velikosti amplitudy, avšak bez kurzoru bychom jen stěží přiřazovali k sobě příslušné špičky.



Obr. 40. Kaskádové multispektrum odezvy stolu – šikmý pohled, vertikální směr

Avšak jak již bylo naznačeno v úvodu kapitoly, pro bump test je velikost amplitudy nepodstatná, tudíž pro tuto metodu je mnohem výhodnější užití čelního pohledu. Pokud se vrátíme tedy zpět k obrázku 39, lze z něj vyčíst čtyři významné frekvence, z nichž jednoznačně dominuje frekvence 208 Hz. Lze tedy říci, že pokud by docházelo k buzení stolu na těchto významných frekvencích, tak právě na 208 Hz by byly účinky vibrací pro pracovní desku stolu nejhorší.

9.2.3. Porovnání a vyhodnocení výsledků obou metod:

Již z prvního pohledu na výsledky obou analýz (Tab. 5.) je zřejmé, že jednotlivé výsledky se rozcházejí. To mohlo zapříčinit, že byly špatně definované okrajové podmínky ve výpočtové analýze, ale pravděpodobnější možností je, že v experimentální analýze byla buzena pouze pracovní plocha stolu a tudíž nedošlo k zachycení frekvencí např. bočních vzpěr apod. K tomuto závěru mě vede i téměř shoda frekvencí F4 resp. F2 v oblasti 205 Hz. Dle analytické metody, tato frekvence připadá právě rezonanci buzené pracovní desky, viz obr. 41.

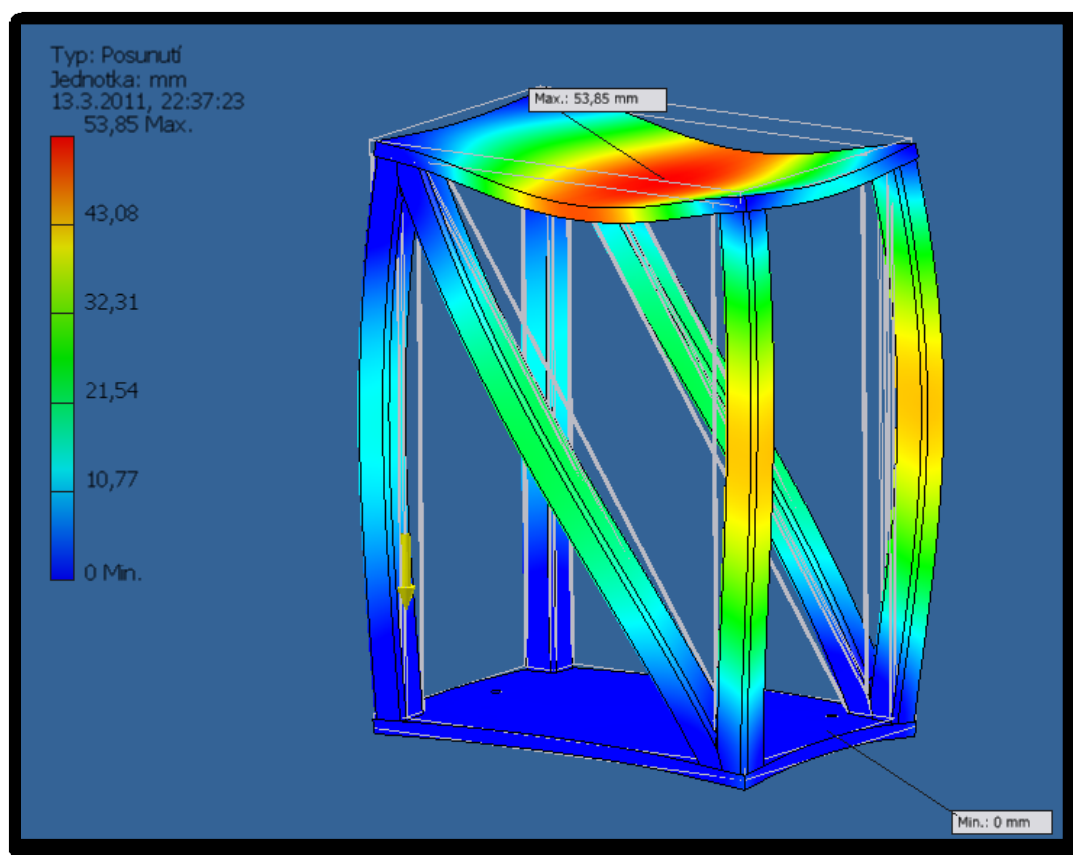
Analytická analýza:

Frekvence	[Hz]
F1	32,68
F2	85,12
F3	112,58
F4	205,42
F5	294,65
F6	323,19
F7	327,43
F8	333,1

Experimentální analýza:

Frekvence	[Hz]
F1	34,0
F2	208,0
F3	386,0
F4	468,0

Tab 5. Porovnání výsledků z analytické a experimentální analýzy



Obr. 41. Vlastní tvar kmitu stolu – 205,42 Hz

Každopádně, bez ohledu na shodnost výsledků obou metod, lze říci, že stůl vyhovuje pro vibrační testování daných výrobků, žádná ze zjištěných frekvencí se neshoduje s významnou frekvencí vývěv XDS. Stůl by tedy neměl ovlivňovat výsledky vibračních analýz.

10. Měření vibrací na XDS 10

10.1. Použité vybavení pro analýzu vibrací:

- **Analyzátor Adash A4400 - VA4Pro:**

Jedná se o čtyřkanálový mobilní analyzátor českého výrobce. Tento analyzátor je aktuálně jeden z nejlepších na trhu, vyniká především dobrým poměrem cena/výkon. Veškerá potřebná specifikace je uvedena v následující tabulce od výrobce.

Vstupní kanály:	• 4 AC s možností ICP® napájení • 4 DC pro procesní veličiny • 1 TACHO pro externí spouštění	Zpracování dat:	• FFT analýza v reálném čase • ENVELOPE - obálková analýza • ACMT - analýza stavu pomaloběžných ložisek • řádová analýza • měření v uživatelských pásmech • měření otáček • měření procesních DC veličin
Vstupní rozsahy:	• AC +/- 12 V peak-peak • DC +/- 24 V	Spouštění:	• manuálně • externě - tachosonda, TTL úrovně • překročením zvolené amplitudy signálu • časovým intervalem • změnou otáček
AD převodník:	• 24 bit, 64 bit zpracování signálu není potřeba AutoGain!	Displej:	• barevný 800 x 600, LCD
Odstup Signál/Šum:	• 110 dB	Rozhraní:	• USB, Ethernet
Vzorkovací frekvence:	• max. 196 kHz pro 1 kanál • max. 64 kHz současně pro 4 kanály • min. 64 Hz	Teplotní rozsah:	• -10°C až +50°C
Synchronizace:	• plně synchronní měření na 4 kanálech	Napájení:	• akumulátor pro 6 hodin, AC 230 V
Rozsah FFT:	• min. 100 čar • max. 25 600 čar	Rozměry:	• 230 x 140 x 60 mm
Režimy měření:	• Datakektor - pochůzková měření • Analyzátor - analytická měření • Balancer - provozní vyvažování strojů • RunUp - měření rozběhů a doběhů • Recorder - záznam signálů	Krytí:	• IP 65
Procesor:	• Intel Atom 1,6 GHz	Váha:	• cca 2000 g
Paměť pro data:	• až 120 GB		

Tab 6. Tabulka parametrů analyzátoru Adash A4400 - VA4Pro [13]

- **Snímač Adash A115-1A**

Adash A115-1A je tříosý akcelerometr řazený do tzv. kategorie „low cost“. Z toho vyplývá, že velkou předností tohoto snímače je jeho cena a výkonové parametry trochu zaostávají. Ovšem v případě, kdy je připojení akcelerometru značným problémem, je užití tohoto snímače nespornou výhodou i přes jeho horší citlivost a frekvenční rozsah.

Citlivost ($\pm 15\%$)	100 mV/g
Měřicí rozsah	± 50 g
Frekvenční rozsah (± 3 dB)	1 - 6500 Hz
Napájení	18 – 30 V (DC)
Teplotní rozsah	-50 až 121°C
Hmotnost	200 g
Snímací prvek	PZT keramika
Konstrukce	smykový
Konektor	4-Pin J konektor

Tab 7. Parametry snímače Adash
A115-1A



Obr. 42. Akcelerometr Adash A115-1A

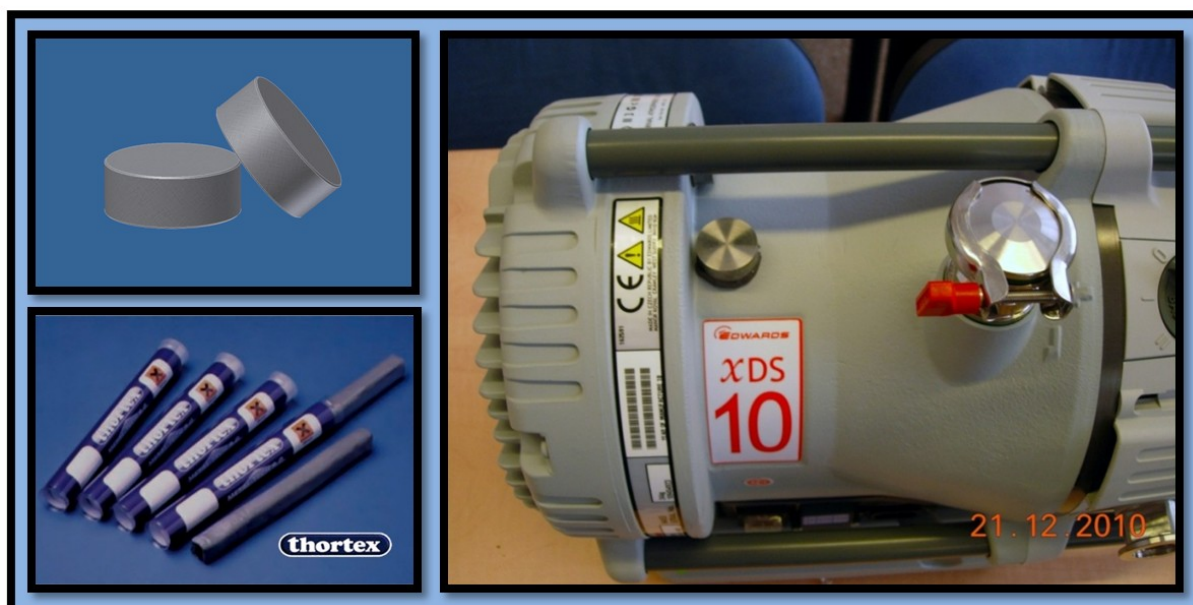
- **Software Adash DDS 2007**

Tento program je především určen pro archivaci a vyhodnocení dat vibrační a technické diagnostiky. Program umožňuje provádět analýzu změn trendů, zpracování spekter, detekci multi-ložiskových frekvencí apod. Uživatel ocení i databázi poruchových frekvencí ložisek.

Samotný program je velmi jednoduchý a práce s ním není žádným problémem. Slabou stránkou programu je obtížné grafické zpracování spekter. Spektra lze zpracovat sice účelně, ale grafické volby jsou poněkud omezené.

10.2. Volba upevnění a umístění snímače vibrací:

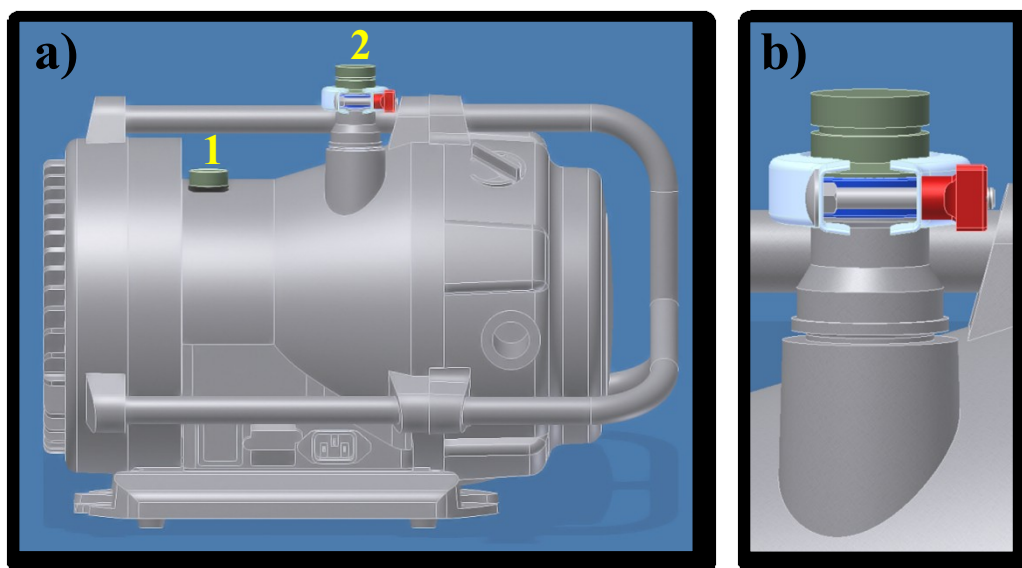
Jak již jsem zmínil v osmé kapitole, umístění snímačů vibrací na vývěvu XDS je díky celohliníkové konstrukci poměrně obtížné. V takovémto případě nám tedy odpadá možnost požití magnetu a rovněž kvůli absenci vhodného místa k upevnění i montáž pomocí šroubu. Z možných upevnění snímače je tedy již na výběr pouze nalepení měřících bodů a připevnění snímače pomocí včelího vosku. Vzhledem k typu a hmotnosti použitého snímače nelze použít ani nalepení včelím voskem, proto byly nakonec na vývěvu nalepeny měřící body. To jsme si mohli dovolit jen díky tomu, že měření proběhlo na vývěvě, kterou společnost Edwards darovala škole pro pokusné účely. Jiné vhodné umístění snímače, které by mohlo být využito i pro měření na výrobní lince se nepodařilo za stávajících okolností vymyslet.



Obr. 43. Umístění měřícího bodu pro snímač vibrací

Měřicí bod byl nalepen co nejbližší uložení hlavního ložiska (viz řez pumpy obr. 29), pro co nejlepší přenos vibrací. Jako měřicí bod byla užita podložka z dobře magnetické nerezové oceli průměru 26 mm a tloušťky 10 mm. K přilepení byl použit tmel Thortex Metal-Tech SG. Jedná se o dvousložkový opravárenský tmel založený na speciálních epoxidových pryskyřicích vytvrzovaných polyamino-aminovou směsí. Výhodou tohoto materiálu je vysoká přilnavost, rychlé vytvrdnutí, snadné míchání a neomezená skladovatelnost. Užití tohoto tmelu však není podmínkou, vhodnou alternativou může být i VersiLok 406, LockTite Depend, LockTite Liquid Metal a jiné.

V rámci zjištění, jak dalece se mohou lišit výsledky vibrační analýzy z lepeného bodu a z ucpávky sání (používáno na výrobní lince – kapitola 8.1), byla pro školní účely vyhotovena zjednodušená ucpávka, na kterou lze magnetem upevnit snímač. Vibrace byly tedy snímány ze dvou bodů dle obr. 44a.

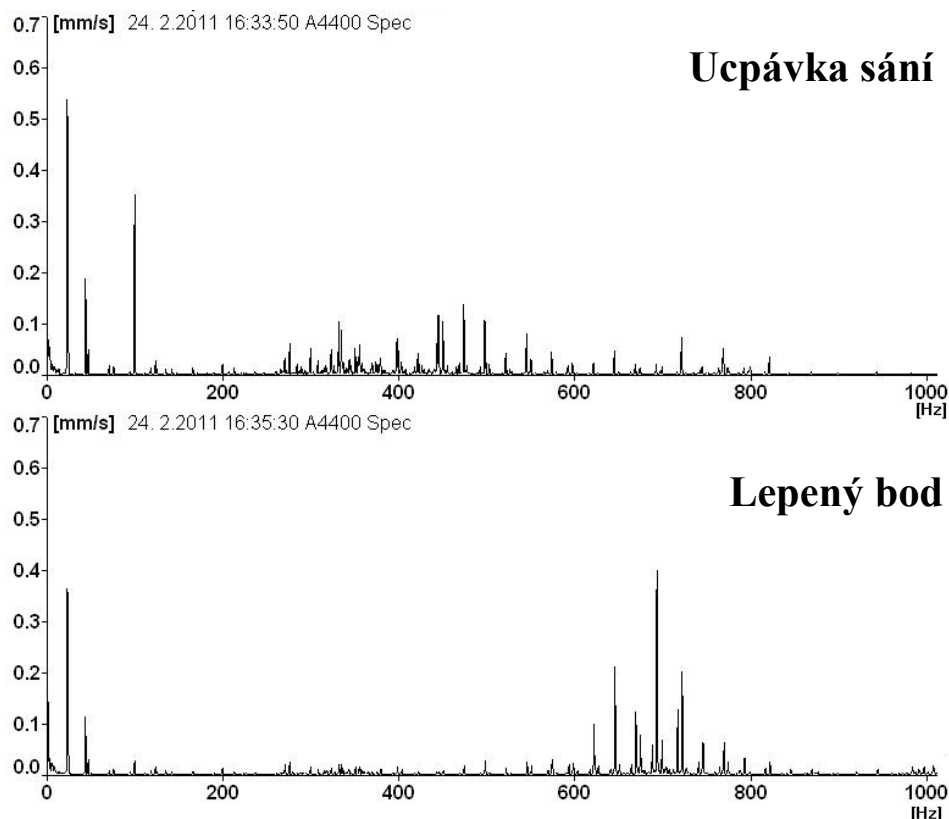


Obr. 44. a) Body umístění snímače vibrací, b) Detailní přichycení ucpávky

Na obr. 44b je znázorněno detailní přichycení ucpávky. Ucpávka je přichycena svorkou k přírubě přes distanční kroužek s těsnícím o-kroužkem. Montáž této ucpávky je omnoho pracnější než užívané na výrobní lince, na druhou stranu se nespolehá jen na sílu vytvořeného podtlaku, ale také i na svěrnou sílu sponky. Další jistou nevýhodou je umístění těsnícího o-kroužku mezi příruby. To může mít velmi negativní vliv oproti těsnění po stranách užívané na ucpávce z výrobní linky (obr. 35).

10.3. Porovnání výsledků z jednotlivých měřených bodů:

Dříve nežli se pustím do vyhodnocování jednotlivých spekter vibrací, dovolím si provést rychlé porovnání spekter získaných z umístění snímače na měřicím bodu 1 a na ucpávce sání 2 (obr. 44). K tomuto kroku mě vedou očividné rozdíly v jednotlivých spektrech vibrací. Tyto rozdíly se vyskytly ve všech spektrech, bez rozdílu zda jsme měřili rychlost či zrychlení, což jasně ukazuje na špatné měření resp. špatné umístění snímače.



Obr. 45. Porovnání spekter vibrací ucpávka / lepený bod – axiální směr

K nejvíce názorné změně došlo ve spektru pro axiální směr vibrací. Nejen že došlo na ucpávce ke zvýšení amplitudy vibrací na shodných frekvencích, ale především došlo k totální změně tvaru spektra v oblasti 300 až 800 Hz.

Z tohoto důvodu budu v následujících kapitolách používat pro rozbor pouze spektra získaná z lepeného bodu. O věrohodnost údajů z ucpávky sání jsem měl již od začátku jisté pochybnosti. Proto bylo měření několikrát opakováno. Zjištěná reprodukovatelnost výsledků byla velmi špatná. Vibrace o vyšších amplitudách byly zachovány, jen jejich velikost se lehce měnila, ale vibrace o nižších amplitudách byly značně rozdílné. Proto nelze toto umístění snímače doporučit pro přesné měření.

10.4. Hodnota vibrací dle ČSN ISO 10816:

Hodnocení vibrací strojů dle normy ČSN ISO 10816 slouží jako orientační měření, které nám má napomoci s hodnocením aktuálního stavu měřeného stroje. Tento postup aplikujeme zejména u strojů, ke kterým nemáme ještě žádné předchozí hodnoty ani podklady o maximálních možných hodnotách vibrací od výrobce.

Měří se efektivní hodnota rychlosti vibrací v rozsahu 10 až 1000 Hz ve třech směrech. Pro posouzení stavu stroje se používá největší naměřená hodnota. Ta se poté porovnává s tabulkovou hodnotou pro daný stroj.

Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s]	Třída I Malé stroje do 15KW	Třída II Středně velké stroje 15-75KW	Třída III Velké stroje na pevných základech > 75KW	Třída IV Velké stroje na měkkých základech > 75KW
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12				
1,8	B	B	B	A
2,8	C	C	C	A
4,5	C	C	C	B
7,1	D	C	C	B
11,2	D	D	C	C
18	D	D	D	C
28	D	D	D	D
45	D	D	D	D

A	Stav nového stroje.
B	Za tohoto stavu je provoz stroje dovolen po neomezeně dlouhou dobu.
C	Přípustný je krátkodobý provoz stroje, z pravidla jen do doby nejbližší možné opravy.
D	Stav je neuspokojivý, hrozí poškození stroje.

Tab 8. Doporučené hodnoty vibrací dle normy ČSN ISO 10816 [14]

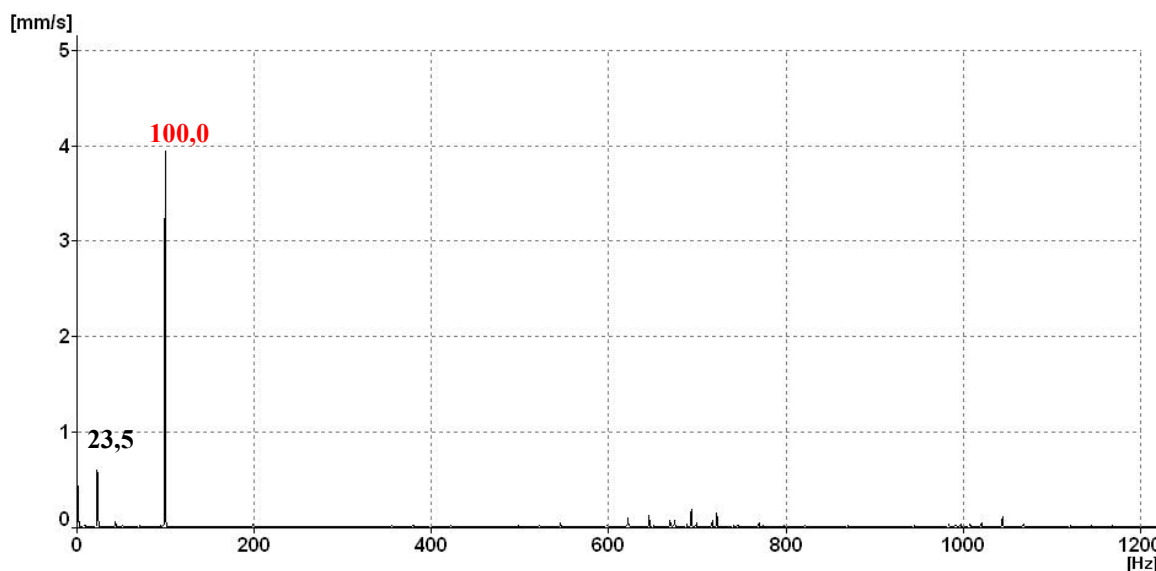
Zjištěné efektivní hodnoty rychlosti vibrací byly 6,2 mm/s v horizontálním směru, 1,9 mm/s ve vertikálním směru a 0,85 mm/s v axiálním směru. Naměřené hodnoty budu porovnávat s hodnotami pro třídu I, kam vývěvy XDS bezesporu patří. Nejvyšší naměřená hodnota zařazuje vývěvu XDS do kategorie C. Jelikož se jedná o nový plně funkční produkt, zanedbám poznámku pro kategorii C (viz tab. 8) a místo ní konstatuji, že vibrace vývěvy XDS jsou větší nežli je běžné u standardních strojů této kategorie (elektromotory, čerpadla, ventilátory apod.). Stejně tak lze konstatovat, že naměřené vibrace jsou v rozporu

s katalogovou hodnotou, kde výrobce garantuje efektivní hodnotu vibrací menší než 4,5mm/s. Avšak neuvádí normu ani měřený rozsah v jakém by měla být hodnota dosažena, čímž mu vzniká jistý prostor pro argumentaci.

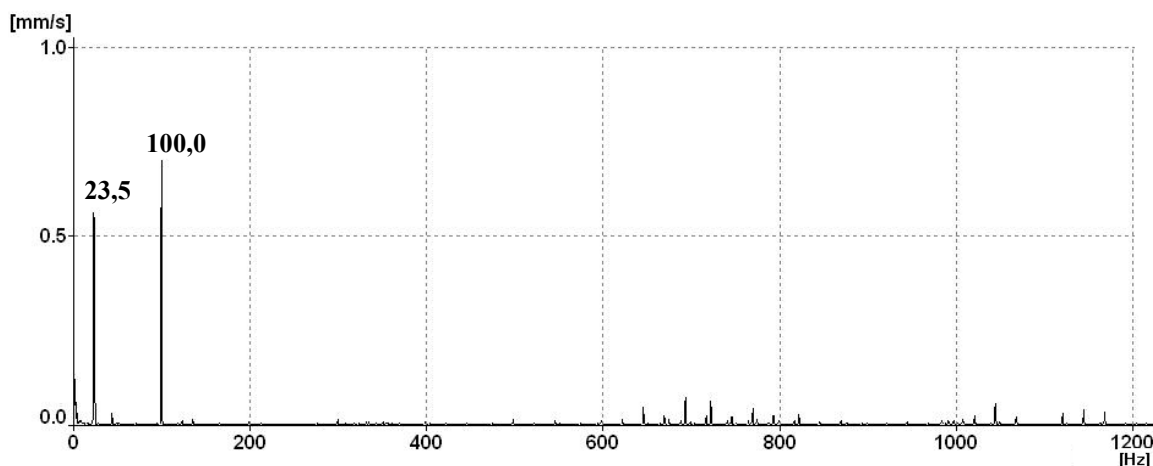
10.5. Vyhodnocení spekter:

Frekvenční spektra rychlosti vibrací:

Při pohledu na rychlostní spektra vibrací v horizontálním (obr. 46) a vertikálním směru (obr. 47), lze konstatovat, že spektra jsou, co se týče frekvenčních složek stejná, avšak velikost amplitudy je na těchto frekvencích podstatně jiná. To je dáno tím, že ve vertikálním směru je pohyb vývěvy omezen podstavou (větší tuhost). Kdežto pohybu vývěvy v horizontálním směru přímo nic nebrání, tudíž amplituda vibrací musí být větší.



Obr. 46. Spektrum rychlosti vibrací – horizontální směr

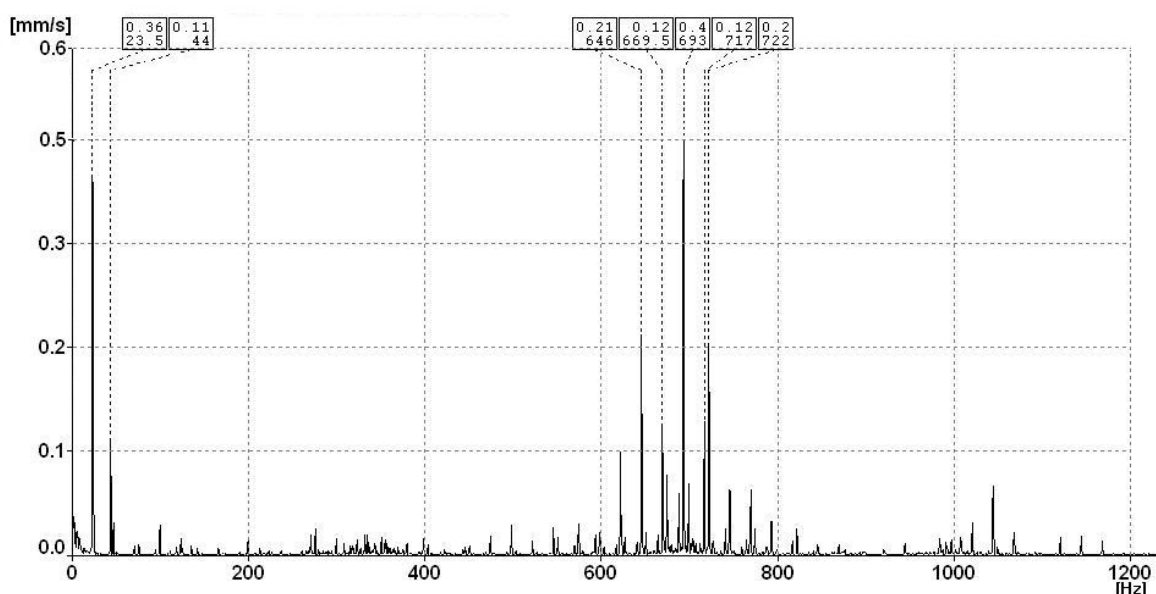


Obr. 47. Spektrum rychlosti vibrací – vertikální směr

Ve spektrech dominují dvě frekvenční složky vibrací. Poměrně zanedbatelné vibrace na otáčkové frekvenci 23,5 Hz a podstatně větší vibrace na frekvenci 100 Hz. Jelikož se ve spektru nevyskytuje žádný druhý ani třetí násobek otáčkové frekvence, lze s jistotou říci, že vibrace na otáčkové frekvenci pocházejí od nevyváženosti. Vzhledem ke konstrukci vývěvy lze považovat tuto hodnotu nevyváženosti za velmi dobrý výsledek.

Vibrace na frekvenci 100 Hz již nelze považovat rozhodně za malé. Zejména v horizontálním směru. Pokud se ve spektru nevyskytují násobky otáčkové frekvence, jejichž čtvrtý násobek by se mohl blížit dané frekvenci, mohu spolehlivě konstatovat, že vibrace na frekvenci 100 Hz jsou elektrického původu. Jedná se o dvojnásobek síťové frekvence, na kterém se zpravidla projevují nejruznější závady elektromotoru, jako je např. nesouměrná vzduchová mezera apod. (viz kapitola 7.4).

V axiálním směru (obr. 48) se nevyskytují žádné vibrace o vyšších hodnotách. V porovnání s předchozími spektry zůstala zachována nevývahová složka vibrací a naproti tomu úplně zmizela složka na 100 Hz. Což ukazuje na to, že tyto vibrace byly silně směrové. Avšak nejzajímavější složkou spektra jsou vibrace v oblasti 600 až 800 Hz. V tomto pásmu jsou největší vibrace generovány na frekvenci 693 Hz a s odstupem otáčkové frekvence (23,5 Hz) jsou v jejím okolí generovány další menší špičky. Tento jev je pravděpodobně spojen s frekvencí průchodu rotorových tyčí (počet tyčí x otáčková frekvence).

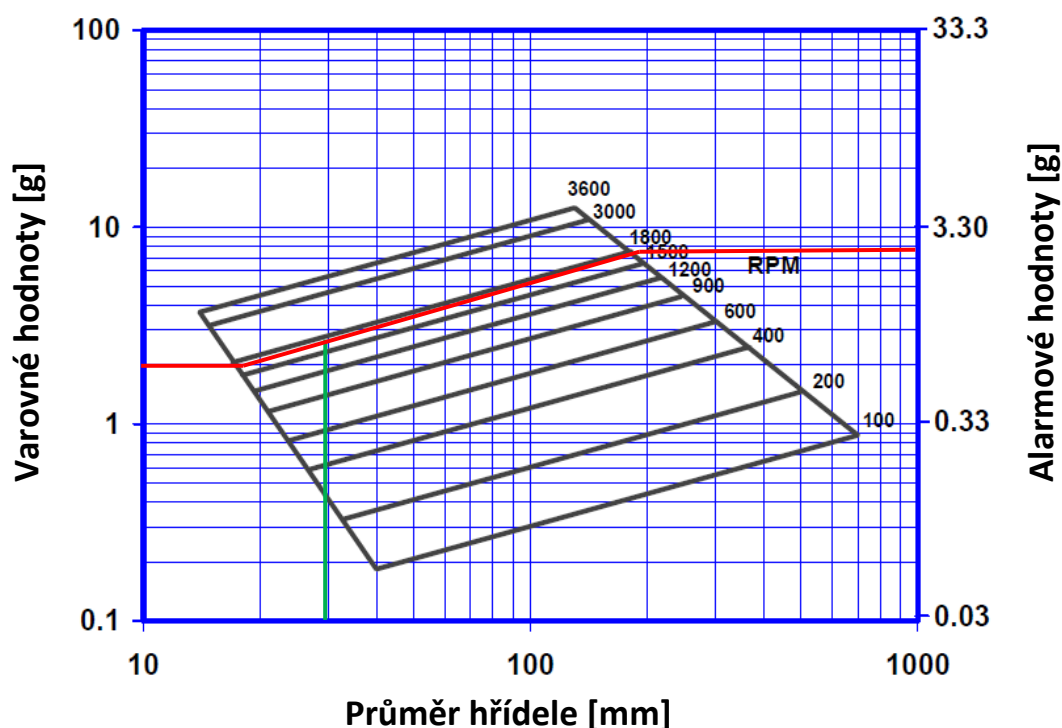


Obr. 48. Spektrum rychlosti vibrací – axiální směr

Analýza obálky zrychlení:

Obálková analýza je metoda vibrační diagnostiky, jejímž hlavním úkolem je odhalení především závad ložisek a případně ozubených převodů. Tyto závady generují vibrace s podstatně menší amplitudou, než jsou vibrace buzené otáčkami. Cílem obálky je tedy odfiltrování vibračních signálů souvisejících s otáčkami stroje a ponechat jen signály, které souvisí s poruchami ložisek.

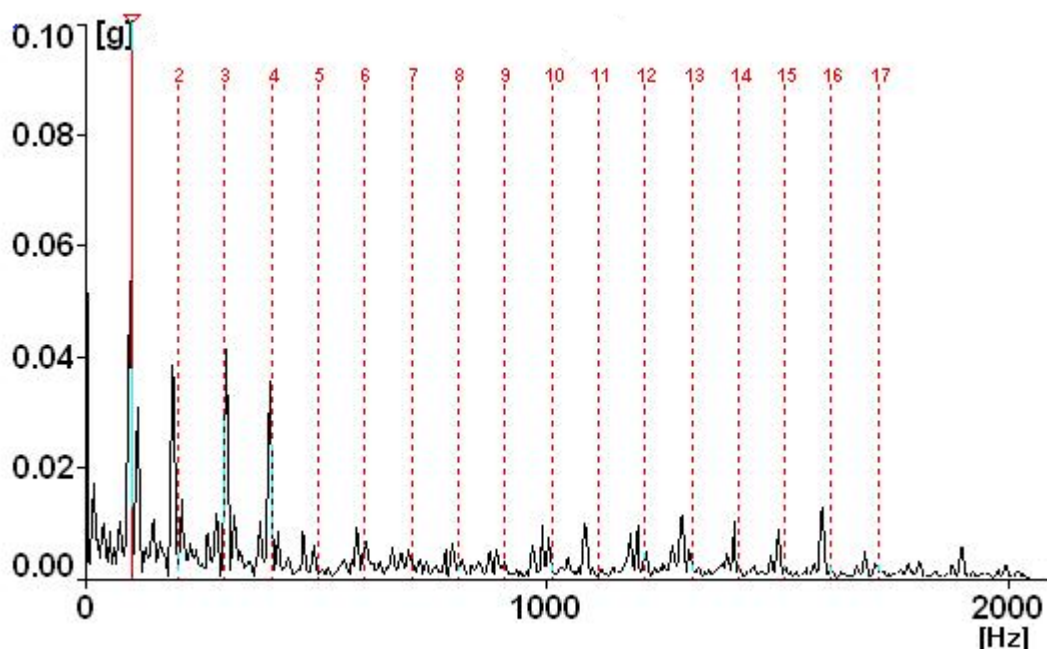
V měřené oblasti (0,5 až 25 kHz) byly naměřeny velmi nízké efektivní hodnoty, které neukazují na závadu ložiska. V horizontálním směru 0,18 g a ve vertikální i axiální směru shodně 0,15 g. Pokud neznáme pro vyhodnocení vhodné maximální hodnoty, např. z dlouhodobých trendů, lze využít orientační graf firmy SKF (obr. 49). Pro stanovení potřebujeme znát jen průměr hřídele a její otáčky. Dle tohoto grafu, můžeme pro vývěvu XDS orientačně stanovit varovnou hodnotu na 2 g a alarmovou na hodnotu 3 g.



Obr. 49. Doporučené hodnoty pro vyhodnocení obálky, dle SKF [15]

Častěji však provádíme diagnostiku ložisek přímo ze spekter obálky zrychlení. Kromě frekvenčního spektra je výhodné použít i časové. V němž lze někdy jasně vyčíst opakující se děj. Ve frekvenčních spektrech hledáme především špičky na poruchových frekvencích ložisek (BPFO, BPFI atd.) a jejich násobcích. Jelikož měření bylo prováděno na novém stroji,

nenalezl jsem ve spektru jednoznačnou závalu ložisek. Nalezl jsem pouze harmonické násobky frekvence 100 Hz, což by teoreticky mohla být poruchová frekvence vnějšího kroužku ložiska INA 17/40, jehož vypočtená hodnota z odměřených rozměrů je 98,1 Hz. Tyto násobky jsou nejvíce názorné v horizontálním směru (obr. 50).



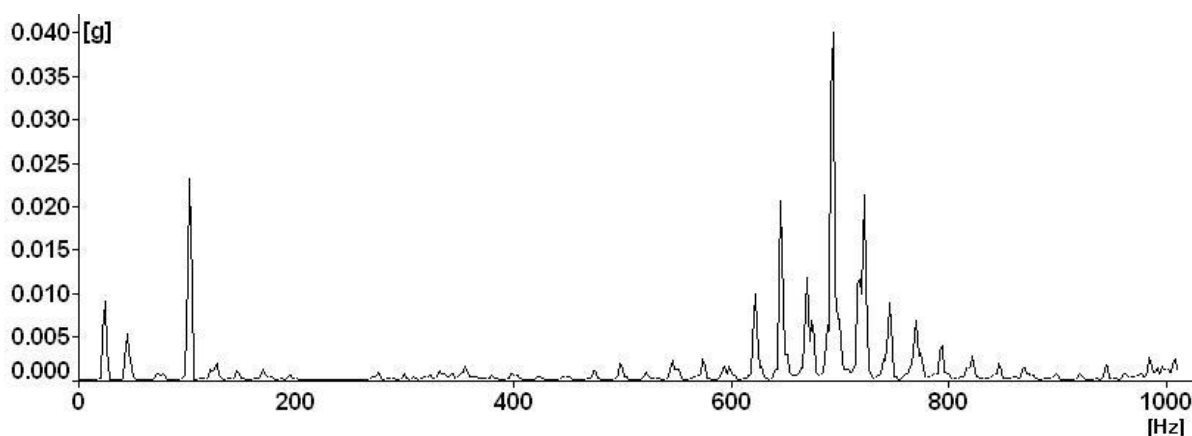
Obr. 50. Frekvenční spektrum obálky – horizontální směr

Avšak vzhledem k tomu, že na frekvenci 100 Hz jsou generovány poměrně silné vibrace elektromotorem, nejsem si jist, zda tyto špičky pochází zrovna od daného ložiska. V případě, že bych chtěl jednoznačně určit původ vibrací, navrhol bych trendování měření a pozoroval případné zvětšující se amplitudy, což by ukazovalo na ložisko.

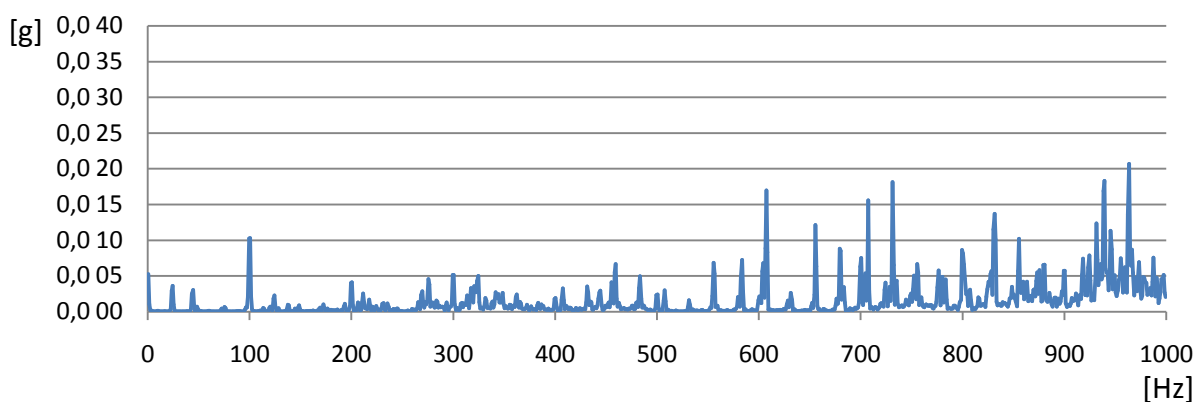
Porovnání spekter zrychlení:

V této kapitole se již nebudu věnovat vyhodnocováním naměřených spekter, nýbrž jen jejich porovnáním s výsledky výstupní kontroly získaných z firmy Edwards. Jen zopakuji, že na výrobní lince jsou vyhodnocovány vibrace jen ve vertikálním a axiálním směru.

Při pohledu na spektra vibrací pro axiální směr (obr. 51 a 52) lze říci, že se výsledky shodují cca do frekvence 200 Hz. Poté se vzrůstající frekvencí roste v Edwards spektru i podíl šumu a ve frekvenci nad 600 Hz je shodnost spekter už spíše náhodná. Nicméně amplitudový rozsah je více méně shodný.

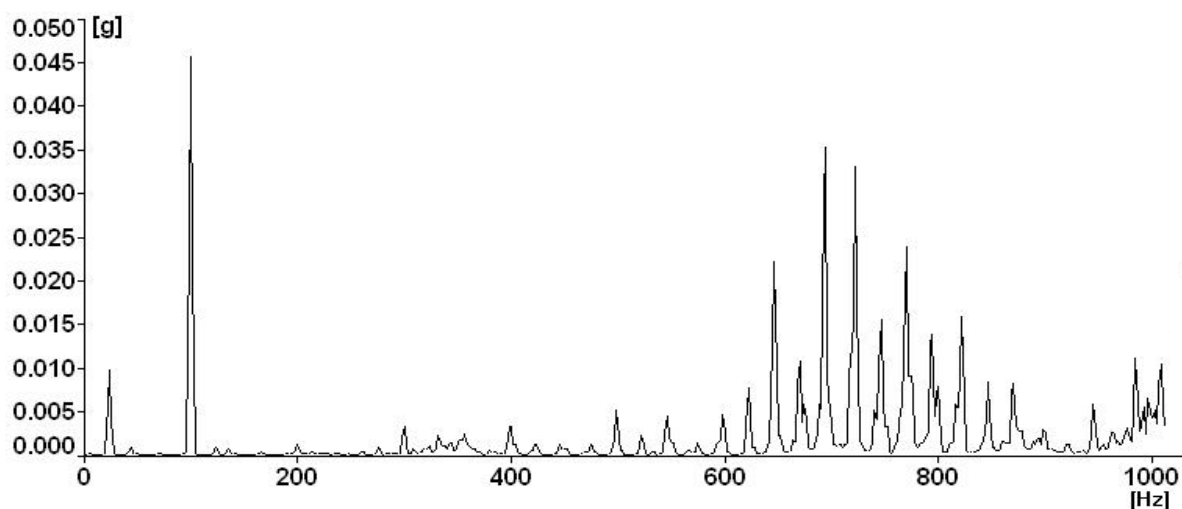


Obr. 51. Spektrum zrychlení vibrací – axiální směr, na lepeném bodě

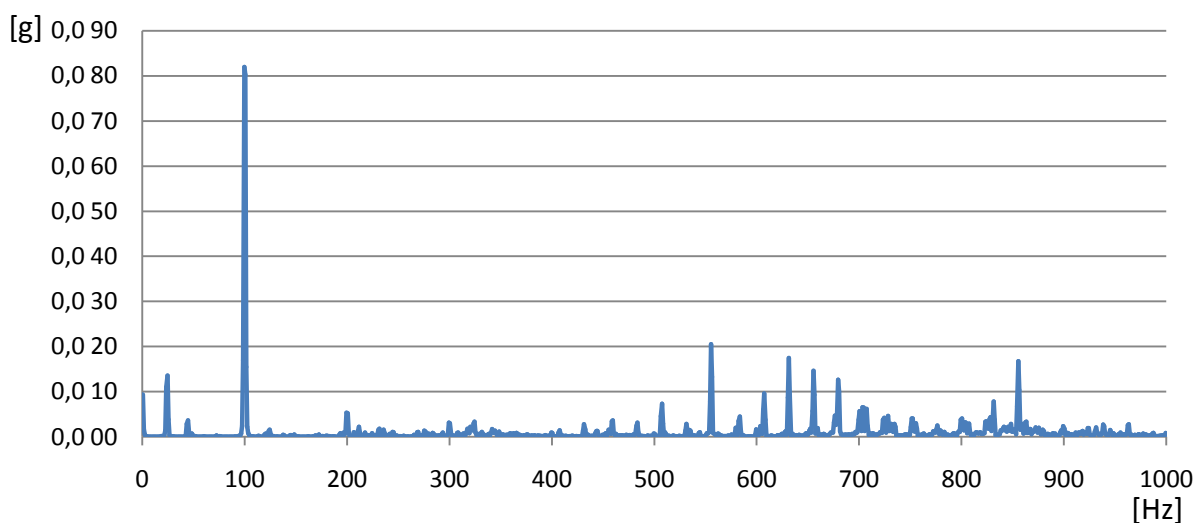


Obr. 52. Spektrum zrychlení vibrací – axiální směr, Edwards

Ve spektrech pro vertikální směr (obr. 53 a 54) je situace obdobná jako v axiálním směru avšak s tím rozdílem, že vibrace na 100 Hz jsou v Edwards spektru téměř na dvojnásobné hodnotě.



Obr. 53. Spektrum zrychlení vibrací – vertikální směr, lepený bod



Obr. 54. *Spektrum zrychlení vibrací – vertikální směr, Edwards*

Neshodnost výsledků může být dána několika vlivy. Nejen tedy, že byla pro měření použita jiná přístrojová technika (vliv by měl být minimální), ale především způsob a místo uchycení (viz kapitola 8.1 a 10.2). Rovněž mohlo mít na výsledky vliv i to, že vývěva byla v době měření v záběhu. V této oblasti se mohou její vibrační charakteristiky měnit velmi rychle s každou hodinou činnosti. Nicméně vzhledem k poměrně velké nahodilosti špiček vibrací v Edwards spektrech se přikláním k variantě, že je to způsobeno špatným uchycením snímačů vibrací.

Jen pro doplnění uvádím v příloze C měření zrychlení vibrací na vyráběné zátce dle obr. 44. Ve spektru pro vertikální směr lze nalézt jistou shodu s předchozími dvěma měřeními avšak axiální směr je zcela odlišný a jsou v něm zachyceny poměrně vysoké vibrace již od 300 Hz výše. Toto měření opět jen potvrzuje fakt, že měření na zátce není vhodné.

11. Měření hlučnosti vývěvy dle ČSN ISO 3745:

Hlučnost vývěv může hrát pro některé zákazníky velmi důležitou roli a to především z hygienických důvodů (viz kapitola 5.2). Firma Edwards uvádí ve svém katalogu poměrně nízkou hlučnost 55 dB(A). Ovšem o této hodnotě začnete ihned po zapnutí vývěvy pochybovat.

Od následujícího měření tedy očekávám zjištění skutečné hlučnosti vývěvy a získání frekvenčního spektra hluku, které by se mohlo výrobcí hodit pro další testování a výrobu vývěv.

11.1. Použité vybavení:

Měření bylo provedeno v polobezodrazové místnosti jež je vybudována na půdě VŠB-TU Ostrava. Polobezodrazová místnost splňuje podmínky měření hluku pro frekvence od 100 Hz.

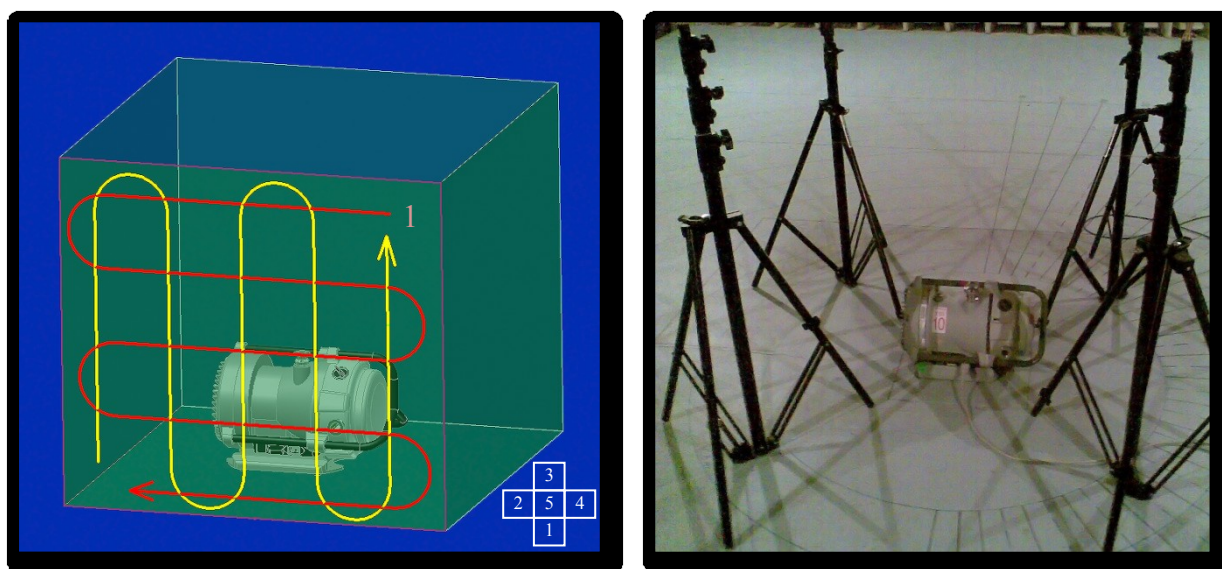


Obr. 55. Polobezodrazová komora VŠB-TU Ostrava

Hluk vývěvy byl snímán $\frac{1}{2}$ palcový mikrofon do volného akustického pole od firmy Brüel & Kjær (typ: 4189 A-021). Jmenovitá citlivost mikrofону je 50 mV/Pa a jeho frekvenční rozsah je 6,3 až 20000 Hz. Ke zpracování signálu byl použit čtyřkanálový analyzátor od téže firmy (typ: 3109) a software Pulse Labshop 12.0.

11.2. Postup měření:

Z možných postupů snímání akustického tlaku emitovaného vývěvou jsem zvolil skenování fiktivní plochy. Snímanou plochou byla krychle (viz obr. 56a) do jejíhož středu podstavy je nutné umístit vývěvu. K přibližné realizaci měřicí plochy byly použity stojany mikrofónů, mezi nimiž byl pro určení výšky natažen provázek, viz obr. 56b. Samotné skenování spočívá v šedesátivteřinovém pohybu mikrofónu vždy po jedné z pěti snímaných ploch krychle dle obr. 56a. Z počátku byl mikrofón veden přibližně 30 vteřin v horizontálně a poté v návaznosti 30 vteřin vertikálně. Z každého skenování jsou zaznamenány hodnoty akustického tlaku pro danou plochu v třetinooktávové stupnici. Každé měření bylo pro zlepšení přesnosti výsledků provedeno 2x.



Obr. 56. a) skenovaná plocha vyznačeným pohybem mikrofónu, b) skutečné vyznačení měřené plochy

Po ukončení skenování vývěvy je nutné změřit i hluk pozadí v bezodrazové komoře. Pokud by byl hluk pozadí příliš velký, je nutné vypočítat korekční faktor, který koriguje vliv měřicí místnosti (viz ČSN ISO 3744).

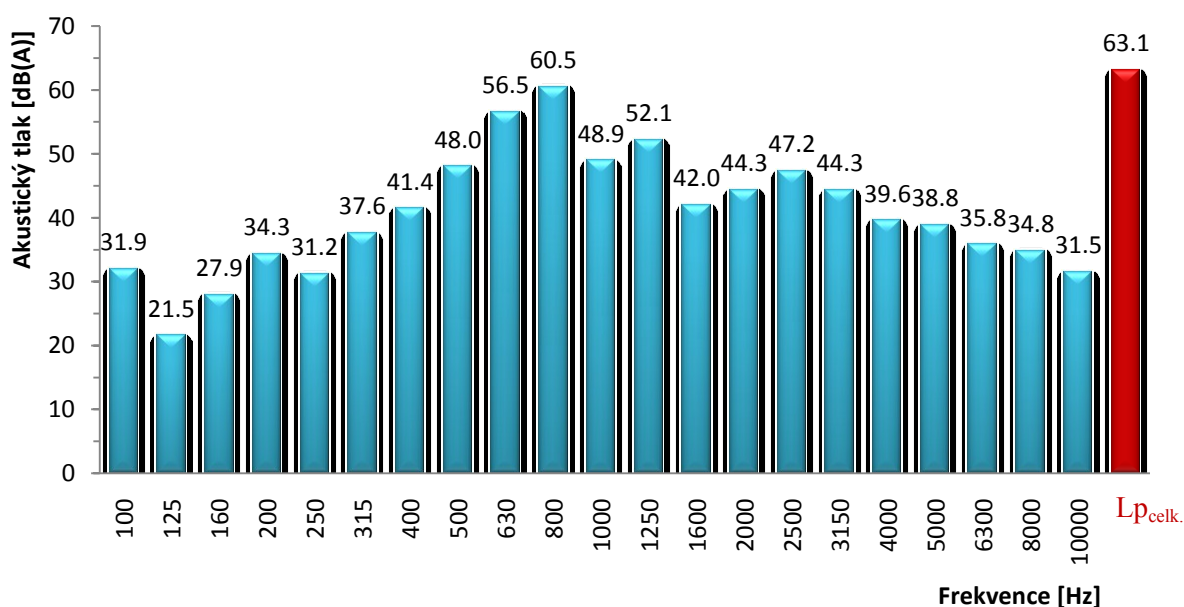
Naměřené hodnoty a podrobný postup zpracování hodnot je uveden v příloze D.

11.3. Vyhodnocení hlučnosti vývěvy:

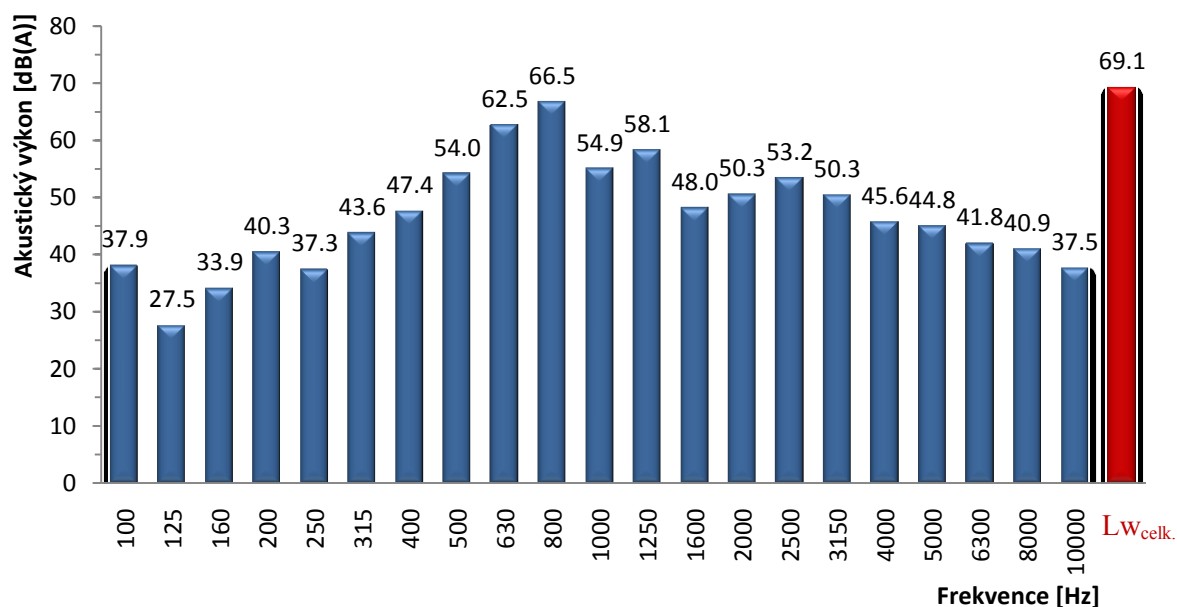
Zjištěné hodnoty hlučnosti vývěvy nejsou příliš lichotivé. Jak již jsem uvedl v úvodu kapitoly, výrobce uvádí v katalogu hlučnost vývěvy 55 dB(A), ovšem obdobně jako u vibrací neuvádí normu, dle které bylo hodnoty dosaženo, ani zda se jedná o akustický tlak či

akustický výkon. Nicméně ať tak či tak, obě zjištěné celkové hladiny v rozsahu 100 až 10000 Hz jsou poměrně výrazně nad katalogovou hodnotou. Jistou polehčující okolností může být to, že při měření nebylo užito filtru na výfuku vývěvy, který však může dle výrobce utlumit hlučnost jen přibližně o 2 dB.

Dle dosažených výsledků tedy usuzuji, že v katalogu je uváděna pro hodnocení hlučnosti vývěvy hodnota akustického tlaku, protože celková hladina akustického výkonu se dané hlučnosti ani nepřibližuje. Z hlediska zákazníka to však lze považovat za zavádějící informaci, protože objektivní hlučnost nám uvádí právě akustický výkon (je brán ohled na vzdálenost resp. plochu, v které byl hluk snímán). Touto zvýšenou hlučností se tedy mohou dlouhodobě pracující lidé v okolí vývěvy vystavovat rizikům popsaných v kapitole 5.2.

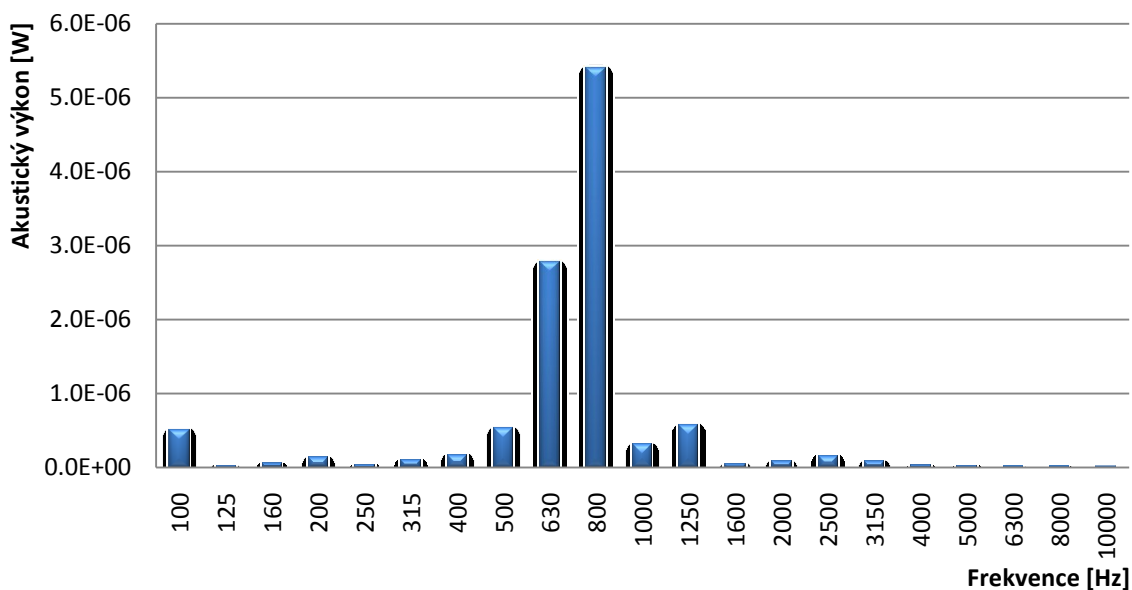


Obr. 57. Hladiny akustického tlaku v třetinooktávových pásmech + celková hladina L_p



Obr. 58. Hladiny akustického výkonu v třetinooktávnových pásmech + celková hladina L_w

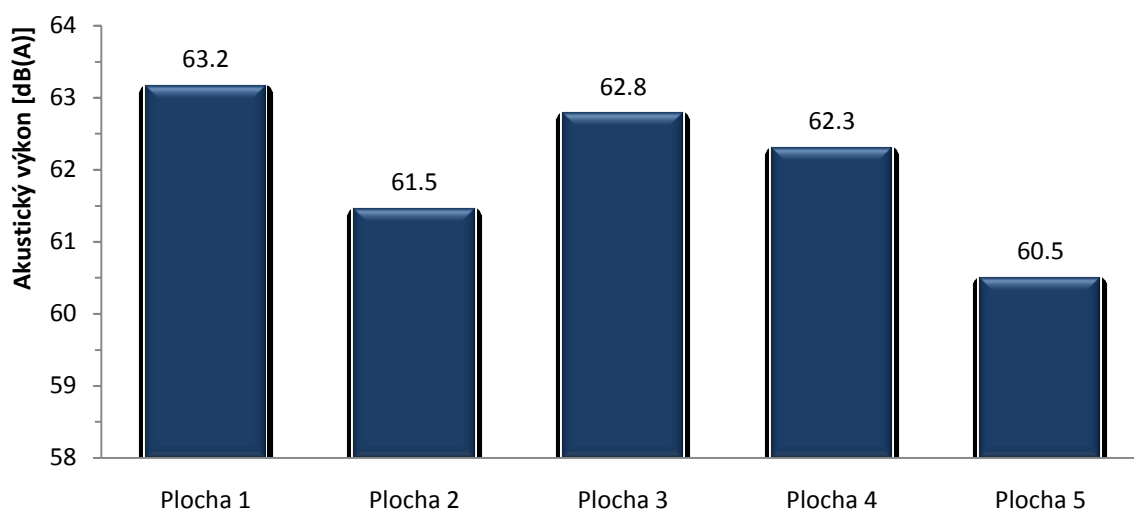
Teoreticky by mělo spektrum hluku odpovídat spektru vibrací. Což ovšem neodpovídá. Je to dáno tím, že v uvedených spektrech je užita logaritmická stupnice. Logaritmického vyjádření tlaku resp. výkonu vzhledem k referenční hodnotě se užívá pro lepší soulad mezi naměřenými hodnotami a sluchovým vjemem člověka. Pro účely technické diagnostiky je nutné užít frekvenční spektrum, kde je užito prosté stupnice, čili vynášené jednotky jsou wattů resp. pascaly.



Obr. 59. Spektrum neváženého akustického výkonu

Uvedené spektrum akustického výkonu (obr. 59) se již poměrně podobá spektru vibrací. Avšak díky užití pásmové analýze není pro diagnostiku tak vhodné jako vibrační. Jednotlivé frekvenční špičky byly „pohlčeny“ do frekvenčního pásma, tudíž nejsme schopni určit přesnou frekvenci poruchy. Došlo i ke změně amplitud. To je dáno tím, že větší četnost frekvenčních špiček v pásmu 800 Hz emituje vyšší energii než jedna špička v pásmu na 100 Hz. Z tohoto důvodu je pro diagnostické účely se vyvarovat užití pásmové stupnice.

Pokud se vrátím zpět k hodnocení hluku vývěvy, lze z provedeného měření říci, že hluk emitovaný vývěvou je největší na ploše na straně výfuku (obr. 60). Naopak nejmenší hluk byl zjištěn na horní ploše (nákres umístění jednotlivých ploch je uveden na obr. 56a).



Obr. 60. Hodnoty akustického tlaku na jednotlivých plochách

12. Závěr:

Počáteční kapitoly diplomové práce byly ryze věnovány úvodu do vakuové problematiky. Získané informace měly sloužit především pro lepší orientaci ve vakuové technice resp. v konstrukci vývěv. Tyto znalosti jsou uplatňovány především ve srovnání šnekových vývěv XDS s konkurenčními. Při analýze trhu bylo zjištěno, že konkurence těchto vývěv je poměrně široká. Zajímavější zjištění však je, že dle mého subjektivního porovnání, jsou na trhu vývěvy rovnocenné a některé dokonce i lepší než vývěvy XDS. Je ale také nutné konstatovat fakt, že vývěvy XDS jsou na trhu už téměř deset let a v současnosti se připravuje nová řada šnekových vývěv pod označením nXDS, která by měla svými parametry opět vrátit Edwards na absolutní vrchol.

Z analýzy konstrukce vývěvy byly stanoveny teoreticky možné poruchové frekvence vývěv XDS 5/10, které lze využít pro vibrodiagnostiku těchto vývěv. Tyto frekvence byly stanoveny na základě všeobecně platných vztahů mezi typem poruchy a jejím projevem ve spektru. Tyto frekvence však nemohly být verifikovány ani zjištěny nejběžnější typy poruch, protože pro praktické měření byla k dispozici jen dobrá nepoškozená vývěva.

Při rozboru současného systému vibrací, užívaného na výrobní lince, jsem nenalezl žádné nedostatky, co se týče přístrojové techniky a jejího nastavení. Stejně tak nebylo prokázáno možné ovlivňování měření rezonancí stolu nebo vibracemi z okolí. Avšak z porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, snímaných z lepeného bodu a ze zátky užívané na výrobní lince, byly zjištěny značné rozdíly. Potvrdilo se tedy mé očekávání, že tento způsob umístění snímače není příliš vhodný.

Při vyhodnocování jednotlivých spekter vibrací na školní vývěvě XDS 10 jsem nenalezl žádné neobvyklé jevy signalizující poruchu. Určitě ale za zmínku stojí poměrně vysoké vibrace buzené elektromotorem na dvojnásobku síťové frekvence v radiálních směrech. Tyto vysoké vibrace nejsou u tohoto modelu ničím neobvyklým. Zdůrazňuji to především proto, že kdyby chtěl výrobce snížit hladinu vibrací svých vývěv, měl by hledat řešení především s dodavatelem elektromotorů. Tato zvýšená úroveň vibrací má za následek i poměrně nelichotivou celkovou efektivní hodnotu vibrací dle ČSN ISO 10816. Naměřená hodnota byla 6,2 mm/s (katalogová hodnota výrobce je < 4,5mm/s, bez specifikace normy).

V samotném závěru práce bylo provedeno akustické měření v polobezodrazové komoře dle ČSN ISO 3745. Od tohoto měření jsem neočekával žádný významný diagnostický

efekt. Cílem měření spíše bylo zjistit skutečnou hlučnost vývěvy, na kterých frekvencích je emitován nejvyšší hluk a v kterém směru. Při porovnání zjištěných hodnot s katalogovou, lze jen konstatovat, že jsou vyšší. Výrobce totiž opět neuvádí normu, dle které bylo hodnoty dosaženo, ani měřenou veličinu uváděné hodnoty.

Využití současné vibrační diagnostiky v rámci výstupní kontroly vývěv XDS má jistě svůj smysl a zachytí velké procento špatných kusů. V rámci optimalizace procesu, bych určitě doporučil realizovat jiné připevňování snímačů vibrací na vývěvu. Určitě by se tím vyřešili problémy s reprodukovatelností výsledků, nehledě na zkreslování spekter. Při vyhodnocení stavu vývěvy bych doporučil, aby používané sdělení vyhovuje/nevyhovuje bylo doplněno o frekvenci, na které došlo k překročení alarmové hodnoty. Proces hledání závady by se tak nestal jen čistě intuitivní záležitostí nebo metody pokus-omyl. Další vhodnou úpravou procesu by mohlo být vedení historie naměřených výsledků, které by mohlo pomoci např. v odhalování zhoršené kvality dodávaných komponentů apod. Nehledě na získání „průměrného“ spektra, podle kterého bychom mohli případně upravit hranici alarmových hodnot.

13. Použité zdroje:

- [1] ERBEN, Milan . *Vakuová technika : Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií* [online]. [s.l.] : Univerzita Pardubice, 2008 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <http://webak.upce.cz/~koanch/DOWNLOAD/Ucebni%20texty/Skriptum_vacuum.pdf>.
- [2] Pfeiffer Vacuum. *Www.pfeiffer-vacuum.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Know How. Dostupné z WWW: <<http://www.pfeiffer-vacuum.com/know-how/vacuum-generation/piston-vacuum-pumps/technology.action?chapter=tec2.4>>.
- [3] MUELLER, Dieter . *Dry Vacuum Pumps : Presentation - AIV Congress, Senigallia, Italy 2009* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/ecomaXL/oe_VACUUM_EN_download_documents>.
- [4] CHEW, A.D. . *Mechanical vacuum pumps* [online]. Crawley, United Kingdom : [s.n.], 2006 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.edwardsvacuum.com/uploadedFiles/Resource/Technical_Articles/Mechanical%20vacuum%20pumps.pdf>.
- [5] Busch Vacuum. *Www.buschpumps.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Přehled produktů - Seco. Dostupné z WWW: <<http://www.buschpumps.cz/produkty/prehled-produktu/seco/prospekty/>>.
- [6] Podkladové materiály fy Edwards s.r.o., Jana Sigmunda 300, Lutín, 783 49
- [7] NENADÁL, Jaroslav. *Měření v systémech managementu jakosti*. Praha : Management Press, 2001. 310 s. ISBN 80-7261-054-6.
- [8] Propagační tiskovina Státního zdravotního ústavu . *Vibrace : Vznik vibrací, hodnocení a povolené hodnoty, vliv vibrací na zdraví člověka a možnosti prevence*. In [online]. [s.l.] : [s.n.], 1998 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.bozpinfo.cz/priloha/vibrace.pdf>>.
- [9] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901-9362-5.









- [10] LIBERKO, Miloš . *Hluk v prostředí : Problematika a řešení* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2004 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <http://osha.europa.eu/fop/czech-republic/cs/publications/files/hluk_text.pdf>.
- [11] BERRY, James E. . *Illustrated Vibration Diagnostics Chart* [online]. Český překlad. [s.l.] : Technical associates of Charlotte, 2005 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_4b.pdf>.
- [12] BILOŠ, Jan. *Ložiska : Presentace* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2011 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_6.pdf>.
- [13] Adash s.r.o. *A4400 - VA4Pro : Informační leták* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2011 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <http://www.adash.eu/doc/a4400/A4400_info_CZ.pdf>.
- [14] ČSN ISO 10816. *Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice*. [s.l.] : [s.n.], 1.3.1998. 24 s. ISSN 011412, 8590963515854
- [15] SKF. Recommended Initial Alarm Criteria for Bearing Condition Assessment. In WEI, Jim . *SKF- Reliability Engineering* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2004 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.skf.com/portal/skf/home/apitudexchange?contentId=0.237932.237933.237934.237960.238188>>.

14.Seznam příloh:







Příloha A.	77
Příloha B.	79
Příloha C.	81
Příloha D.	82

Příloha A.








Hodnocení parametrů a konkurence vývěv XDS 5:

	Váha atributu	Váha parametru	Výrobce																	
			Model		XDS 5		SH -110		DIS - 090		XtraDry 150		DTC-120		SC 5 D		SV 1005 D		ISP-90	
			Princip		Šnekový		Šnekový		Šnekový		Pístový		Membránový		Šnekový		suché lamelové		Šnekový	
Atributy jakosti	66.67	29.0	Sací výkon	m^3/h	4.8	5.5	5.6	7.75	5.4	7	7.5	10	7.1	9	5.4	7	5	6.25	5.4	7
		28.0	Maximální hodnota vakua	hPa	0.07	8.25	0.066	9	0.05	10	0.1	6.5	0.1	6.5	0.05	10	150	3.5	0.05	10
		10.0	Výkon motoru	kW	0.3	7.25	0.19	8.5	0.15	9.25	0.55	5.75	0.58	5	0.15	9.25	0.14	10	0.15	9.25
		9.0	Hmotnost	kg	23	6.5	19	7.5	14	8.5	30	4.5	27	5.5	14	8.5	6	10	14	8.5
		24.0	Hlučnost	[dB(A)]	55	8.75	56	8	52	10	65	5.5	72	4	52	10	63	6.5	52	10
Σ		100																		
Atributy ceny	33.33	34.0	Cena	\$	4599	6.25	4280	7	5800	4	5700	4.75	3500	8.5	4000	7.75	700	10	5000	5.5
		66.0	očekávané náklady vzhledem k dalšímu provozu (servis, atd)			9		9		9		7		5		9		4		9
Σ		100																		

Hodnocení parametrů a konkurence vývěv XDS 10:

	Váha atributu	Váha parametru	Výrobce													
			Model	XDS 10	Triscroll 300	Scrollvac s10	MVP 160	SV 1010	Fossa 0009							
			Princip	Šnekový	Šnekový	Šnekový	Membránový	suché lamelové	Šnekový							
Atributy jakosti	66.67	29.0	Sací výkon	m^3/h	9.3	8	12.6	10	9.5	8	9.6	8	10	8.5	9	7.5
		28.0	Maximální hodnota vakua	hPa	0.07	8.5	0.013	10	0.07	8.5	0.1	7	150	3	0.075	8
		10.0	Výkon motoru	kW	0.3	9	0.56	7	0.55	7	0.39	8.5	0.37	8.5	0.2	10
		9.0	Hmotnost	kg	24.5	9	26.4	7	30	4	24	9	21	10	25	8
		24.0	Hlučnost	[dB(A)]	55	9	68	4	60	7	53	10	60	7	57	8
Σ		100														
Atributy ceny	33.33	34.0	Cena	\$	5900	7	5930	7	6600	6	4300	8	1000	10	10000	2
		66.0	očekávané náklady vzhledem k dalšímu provozu (servis, atd)			9		9		9		5		4		9
Σ		100														

Hodnocení parametrů a konkurence vývěv XDS 35i:

	Váha atributu	Váha parametru	Výrobce															
			Model		XDS 35	PDV 500		DIS - 500		ISP-500		ACP 40		SC 30 D		Fossa 0030		
			Princip		Šnekový	Šroubový		Šnekový		Šnekový		Roots		Šnekový		Šnekový		
Atributy jakosti	66.67	29.0	Sací výkon	m^3/h	35	9	30	7	30	7	30	7	37	10	30	7	30	7
		28.0	Maximální hodnota vakua	hPa	0.01	9	0.005	10	0.01	9	0.01	9	0.03	7	0.01	9	0.01	9
		10.0	Výkon motoru	kW	0.52	8	0.3	10	0.4	7	0.6	7	0.7	6	0.6	7	0.6	7
		9.0	Hmotnost	kg	48	5.5	20	10	44	6.5	46	6	32	8	44	6.5	38	7.5
		24.0	Hlučnost	[dB(A)]	57	10	58	9	62	7	62	7	65	5.5	62	7	60	8
Σ		100																
Atributy ceny	33.33	34.0	Cena	\$	11000	5.5	6400	10	9000	7.5	8800	8	11000	5.5	8800	8	15000	3.5
			očekávané náklady vzhledem k dalšímu provozu (servis, atd)			8		10		8		8		10		8		8
		66.0																
Σ		100																

Příloha B.

Postup výpočtu MHPZ pro XDS 5 vs. Oerlikon SC 5D:

Sestavení profilu jakosti:

Znaky jakosti (1)	Váha znaků (2)	Náš produkt (3)	Produkt konkurence (4)	Poměr (5) = (3)/(4)	Dílčí ukazatel jakosti (6) = (2)*(5)	Poměr (7) = (4)/(3)	Dílčí ukazatel jakosti (8) = (2)*(7)
Sací výkon	29.0	5.5	7	0.79	22.79	1.27	36.91
Maximální hodnota vakua	28.0	8.25	10	0.83	23.10	1.21	33.94
Výkon motoru	10.0	7.25	9.25	0.78	7.84	1.28	12.76
Hmotnost	9.0	6.5	8.5	0.76	6.88	1.31	11.77
Hlučnost	24.0	8.75	10	0.88	21.00	1.14	27.43
Celkem bodů	100						
Ukazatel jakosti vnímané zákazníkem					0.82		1.23
Míra spokojenosti zákazníka s jakostí		7.32	8.92				

$$\text{Ukazatel jakosti vnímaný zákazníkem} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{hodnot sloupce č.6}}{100}$$

$$\text{Míra spokojenosti zákazníků s jakostí} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{hodnot sloupce č.2} * \text{č.3}}{100}$$

Sestavení profilu ceny:

Atribut ceny (1)	Váha atributu (2)	Náš produkt (3)	Produkt konkurence (4)	Poměr (3)/(4) (5)
Cena	34.0	6.25	7.75	0.81
Očekávané náklady vzhledem k dalšímu provozu (servis, atd)	66.0	9	9	1.00
Celkem bodů	100			
Míra spokojenosti zákazníků s cenou		8.065	8.575	
Ukazatel míry cenové konkurenční schopnosti		0.94		
Ukazatel relativní úrovně ceny		1.06		

$$\text{Míra spokojenosti zákazníků s cenou} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{hodnot sloupce č.2} \cdot \text{č.3}}{100}$$

Ukazatel míry cenové konkurenční schopnosti =

$$= \frac{\text{míra spokojenosti ceny našeho výrobku}}{\text{míra spokojenosti ceny konkurenčního výrobku}}$$

$$\text{Ukazatel relativní úrovně ceny} = \frac{\text{míra spokojenosti ceny konkurenčního výrobku}}{\text{míra spokojenosti ceny našeho výrobku}}$$

Kvantifikace míry hodnoty pro zákazníka

$$MHPZ = J_Q \cdot w_Q \cdot U_C \cdot w_C$$

U_Q ... ukazatel jakosti vnímaný trhem

w_Q ... váha prvku jakosti

U_C ... ukazatel míry cenové konkurenční schopnosti

w_C ... váha prvku ceny

Náš produkt

$$MHPZ = 1,86$$

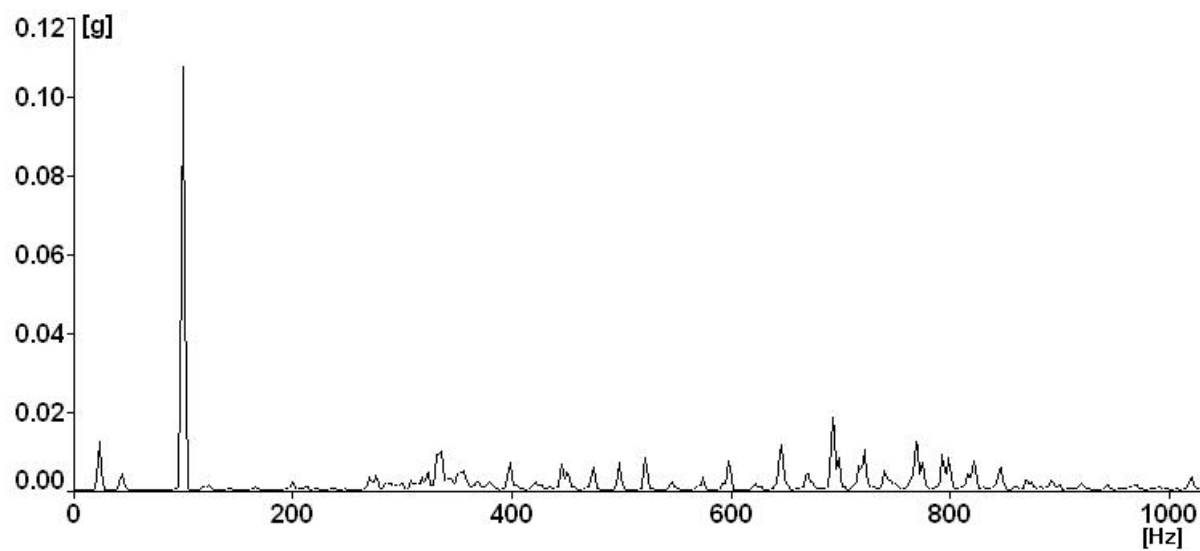
Konkurenční produkt

$$MHPZ = 1,17$$

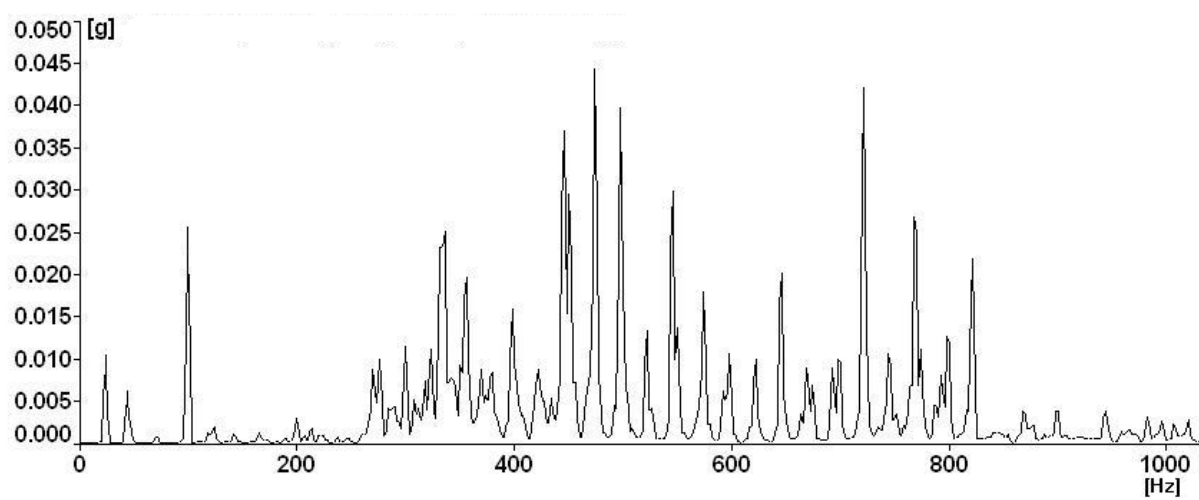
Pokud je hodnota $MHPZ > 1$, tak tím lépe. V našem konkrétním případě je vidět, že náš výrobek ztrácí na konkurenční.

Příloha C.

Vibrace ve vertikálním směru na vyrobené zátce:



Vibrace v axiálním směru na vyrobené zátce:



Příloha D.

1) Tabulka naměřených hodnot:

Frekvence [Hz]	Průměrný akustický tlak [dB]					Pozadí [dB]
	Plocha 1	Plocha 2	Plocha 3	Plocha 4	Plocha 5	
100	47.50	54.43	52.48	47.28	48.31	22.72
125	37.04	38.47	37.68	38.98	34.45	16.97
160	41.35	41.32	40.81	43.28	38.60	15.42
200	47.01	43.78	43.48	47.74	39.90	17.03
250	40.96	38.49	40.08	41.81	35.10	17.20
315	44.02	45.55	42.88	46.09	39.97	9.22
400	46.25	43.08	46.17	49.73	40.60	6.61
500	51.26	47.68	51.52	54.45	46.43	7.08
630	59.65	57.42	59.13	57.80	57.58	5.24
800	62.65	60.63	62.13	60.60	59.90	3.72
1000	48.06	48.96	48.26	51.38	45.66	3.73
1250	51.32	52.86	51.24	52.59	48.03	4.09
1600	40.60	39.26	41.28	43.23	39.06	4.59
2000	42.51	38.46	42.80	46.88	40.10	5.20
2500	46.24	43.54	47.34	47.58	42.99	5.86
3150	43.39	41.04	43.55	45.18	40.64	6.52
4000	38.51	35.25	39.12	41.30	35.72	7.01
5000	39.14	35.95	38.97	40.01	36.01	7.46
6300	36.93	33.35	36.16	37.74	33.35	7.72
8000	36.75	32.72	36.73	37.82	33.53	7.83
10000	34.63	31.53	34.62	35.81	31.75	23.12

2) Stanovení celkové hladiny akustického tlaku:

$$Lp_{celk} = 10 * \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 * L_{pi}} \right]$$

...kde N je počet ploch

Frekvence [Hz]	Plocha 1	Plocha 2	Plocha 3	Plocha 4	Plocha 5	L _{pf} [dB]	$\left[\frac{1}{N} \sum 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right]$
100	56175.2	277303.3	177012.9	53473.7	67761.0	51.0	126345.2
125	5058.0	7027.1	5862.5	7909.1	2786.4	37.6	5728.6
160	13644.9	13560.3	12062.6	21281.6	7244.9	41.3	13558.9
200	50291.0	23858.1	22299.5	59429.2	9763.6	45.2	33128.3
250	12485.9	7067.8	10191.7	15170.2	3237.7	39.8	9630.6
315	25210.4	35931.5	19401.7	40681.3	9933.9	44.2	26231.8
400	42161.9	20331.8	41429.5	94041.6	11487.5	46.2	41890.5
500	133594.9	58665.8	141775.1	278695.5	43948.6	51.2	131336.0
630	922667.0	551562.8	818436.5	602455.5	572387.3	58.4	693501.8
800	1842213.7	1156298.6	1633164.8	1147638.2	978329.2	61.3	1351528.9
1000	63905.0	78664.7	66963.8	137408.9	36786.2	48.9	76745.7
1250	135394.2	193076.8	132953.6	181367.7	63476.1	51.5	141253.7
1600	11474.7	8429.2	13422.2	21027.9	8062.0	41.0	12483.2
2000	17825.8	7018.8	19056.6	48708.0	10227.5	43.1	20567.3
2500	42092.5	22581.4	54147.7	57340.3	19917.3	45.9	39215.8
3150	21846.2	12697.7	22639.4	32988.3	11593.8	43.1	20353.1
4000	7103.2	3346.3	8172.3	13494.4	3731.2	38.6	7169.5
5000	8205.5	3934.4	7892.7	10025.4	3991.7	38.3	6809.9
6300	4929.6	2163.7	4127.1	5942.6	2161.2	35.9	3864.8
8000	4735.5	1870.0	4711.2	6047.5	2252.0	35.9	3923.2
10000	2906.5	1421.2	2896.0	3809.6	1495.7	34.0	2505.8
L _{p celk} = 64.4 dB							

Obdobným způsobem byl zpracován hluk v pozadí, který má hodnotu 28,1 dB, rozdíl L_{p celk} a L_{p pozadí} je 36,4 db, což je dostatečný rozdíl, abychom nemuseli provádět korekci. Ovlivnění měření je minimální.

3) Přepočítání akustického tlaku L_{pi} na akustický výkon:

- To je nutné, protože měření bylo měřeno v kvádru o hraně 0,94 m a výšce 0,85 m.
- Přepočítání naměřených hodnot, dle vzorce:

$$Lw_i = Lp_i + 10 * \log \left(\frac{S}{S_0} \right)$$

4) Stanovení akustického výkonu

- Akustický výkon stanovíme ze vzorce:

$$Lw = 10 * \log \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

... W₀ je referenční hodnota akustického výkonu (10⁻¹²)

- pro stanovení celkového výkonu W je potřeba nejprve hodnoty L_{wi} odlogaritmovat

$$\left(= \left(10^{\frac{L_{wi}}{10}} * 10^{-12} \right) \right) \text{ a poté až sčítat výkon na jednotlivých frekvencích resp.}$$

plochách, viz následující tabulka.

Frekvence [Hz]	Akustický výkon [W]					Akustický výkon na 1/3 oktávy [W]	Akustický výkon na 1/3 oktávy [dB]
	Plocha 1	Plocha 2	Plocha 3	Plocha 4	Plocha 5		
100	4.488E-08	2.216E-07	1.414E-07	4.273E-08	5.414E-08	5.047E-07	57.03
125	4.041E-09	5.615E-09	4.684E-09	6.319E-09	2.226E-09	2.289E-08	43.60
160	1.090E-08	1.083E-08	9.638E-09	1.700E-08	5.789E-09	5.417E-08	47.34
200	4.018E-08	1.906E-08	1.782E-08	4.748E-08	7.801E-09	1.323E-07	51.22
250	9.976E-09	5.647E-09	8.143E-09	1.212E-08	2.587E-09	3.847E-08	45.85
315	2.014E-08	2.871E-08	1.550E-08	3.250E-08	7.937E-09	1.048E-07	50.20
400	3.369E-08	1.625E-08	3.310E-08	7.514E-08	9.179E-09	1.674E-07	52.24
500	1.067E-07	4.687E-08	1.133E-07	2.227E-07	3.511E-08	5.247E-07	57.20
630	7.372E-07	4.407E-07	6.539E-07	4.814E-07	4.573E-07	2.771E-06	64.43
800	1.472E-06	9.239E-07	1.305E-06	9.170E-07	7.817E-07	5.399E-06	67.32
1000	5.106E-08	6.285E-08	5.350E-08	1.098E-07	2.939E-08	3.066E-07	54.87
1250	1.082E-07	1.543E-07	1.062E-07	1.449E-07	5.072E-08	5.643E-07	57.52
1600	9.168E-09	6.735E-09	1.072E-08	1.680E-08	6.442E-09	4.987E-08	46.98
2000	1.424E-08	5.608E-09	1.523E-08	3.892E-08	8.172E-09	8.217E-08	49.15
2500	3.363E-08	1.804E-08	4.326E-08	4.581E-08	1.591E-08	1.567E-07	51.95
3150	1.746E-08	1.015E-08	1.809E-08	2.636E-08	9.263E-09	8.131E-08	49.10
4000	5.675E-09	2.674E-09	6.530E-09	1.078E-08	2.981E-09	2.864E-08	44.57
5000	6.556E-09	3.144E-09	6.306E-09	8.010E-09	3.189E-09	2.721E-08	44.35
6300	3.939E-09	1.729E-09	3.298E-09	4.748E-09	1.727E-09	1.544E-08	41.89
8000	3.784E-09	1.494E-09	3.764E-09	4.832E-09	1.799E-09	1.567E-08	41.95
10000	2.322E-09	1.136E-09	2.314E-09	3.044E-09	1.195E-09	1.001E-08	40.00
Akustický výkon na ploše [W]	2.736E-06	1.987E-06	2.572E-06	2.268E-06	1.495E-06	$\Sigma = 1.106E-05$	
Akustický výkon na ploše [dB]	64.37	62.98	64.10	63.56	61.75	↓	
Lw celk =						70.43 dB	

Vypočtené hodnoty, jsou hodnoty akustického tlaku resp. výkonu bez váhového filtru. Pokud jsou potřeba stanovit vážené hodnoty, stačí od výchozích hodnot odečíst korekční hodnoty váhové funkce dle následující tabulky:

rekvence [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Korekce [dB]	-19.1	-16.1	-13.4	-10.9	-8.6	-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0

1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
0.6	1	1.2	1.3	1.2	1	0.5	-0.1	-1.1	-2.5